

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Optimalizace kompenzačního kiosku**  
**Optimization of Compensation Kiosk**

2014

Pavel Klekner

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Klekner**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Optimalizace kompenzačního kiosku**  
**Optimization of Compensation kiosk**

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor problematiky kompenzace jalové energie.
2. V rámci optimalizace kompenzačního kiosku realizujte návrh výkonového kondenzátoru pro zadané parametry (dle požadavků zadavatele SD).
3. V rámci návrhu ověřte oteplení kondenzátorového svitku, návrh pojistky a vybíjecího odporu.
4. Rozeberte dosažené výsledky a porovnejte se stávajícím stavem.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal

Dne 1.5.2014

Podpis\_\_\_\_\_

## **Abstrakt**

V práci je představena problematika jalové energie, jejího vlivu na elektrickou síť. Jsou zde analyzovány možnosti kompenzační energie s postupným nevedením na kompenzační kondenzátory. Jsou tu popsány základní vlastnosti a typy kondenzátorů. V rámci vysokého napětí se soustředíme na svitkové kondenzátory. Pro pochopení nastíníme technologii výroby, zároveň popíšeme základní materiály používaný jako dielektrikum.

V rámci optimalizace kompenzačního kiosku popíšeme současnou situaci a vysvětlíme námi zvolený způsob optimalizace.

Vytvoříme návrh svitku kondenzátoru včetně vybíjecího odporu a vnitřní pojistky.

## **Klíčová slova**

Dielektrikum, Jalová energie, Kapacita, Kompenzační kiosek, Kondenzátor, Permittivita, Pojistka, Rezistor, Samoregenerace

## **Abstract**

In the work is presented the problematic of reactive power, its impact on electric network. We analyze the power compensation methods with fluent transit to the topic of compensation capacitors. Here are described different types of capacitors and their attributes. With the high current we concentrate on the scroll capacitors. We'll look into the basics of production technology, we'll describe the basic dielectric materials.

## **Key words**

Dielectric materials, Reactive power, capacity, Compensation kiosk, Capacitor, Discharge resistor, Permittivity, Fuse, Resistor, Self-healing, Self-regeneration.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\alpha$ (W/ m <sup>2</sup> )	součinitel přestupu tepla, jednotka, Watt na metr čtvereční
Al	hliník – chemický prvek
$b_a$ (m)	šířka elektrody, jednotka metr
C (F)	elektrická kapacita, jednotka Farad
$\cos \varphi$	účinník
ČSN	Česká technická norma
$d$ (m)	tloušťka dielektrika, jednotka metr
$E_p$ (V/m)	elektrická pevnost, jednotka volt na metr
$\epsilon_0$	permitivita vakua
$\epsilon_r$	relativní permitivita
$f$ (Hz)	frekvence, jednotka Hertz
Fe	železo – chemický prvek
$I$ (A)	elektrický proud, jednotka Ampér
$k$ (-)	koeficient kompenzace
$L$ (H)	indukčnost, jednotka Henry
$l_a$ (m)	délka elektrody, jednotka metr
$\lambda$ (W/m.K)	tepelná vodivost, jednotka Watt na metr a Kelvin
$\omega$ (rad/s)	úhlová rychlost, jednotka radián ze sekundu
$P$ (W)	činný výkon, jednotka Watt
PP	polypropylén
PS	polystyrén
$Q$ (VAR)	jalový výkon, jednotka VAR
$R$ ( $\Omega$ )	elektrický odpor, jednotka Ohm
$R$ (K/W)	tepelný odpor, jednotka Kelvin na Watt
$\rho$ ( $\Omega$ .mm <sup>2</sup> .m)	měrný elektrický odpor, jednotka Ohm na milimetr čtvereční na metr
$S$ (m <sup>2</sup> )	plocha elektrody, jednotka metr čtvereční
$\tau$	časová konstanta
$\vartheta$ (°C)	teplota, jednotka stupeň Celsia
$\Theta$ (K)	absolutní teplota, jednotka Kelvin
$U$ (V)	elektrické napětí, jednotka Volt

## Obsah

Prohlášení studenta.....	3
Abstrakt .....	4
Klíčová slova.....	4
Abstract .....	4
Key words .....	4
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	5
Obsah.....	6
Úvod .....	1
1. Rozbor problematiky kompenzace jalové energie .....	2
1.1 Střídavá síť s paralelním kondenzátorem .....	2
1.2 Legislativa .....	4
1.3 Druhy kompenzace.....	5
1.3.1 Individuální - jednotlivá kompenzace .....	5
1.3.2 Skupinová kompenzace .....	6
1.3.3 Centrální kompenzace .....	6
1.3.4 Kombinovaná kompenzace .....	7
1.4 Základní rozdělení technických prostředků pro kompenzaci jalového výkonu .....	7
1.4.1 Rotační kompenzační zařízení.....	7
1.4.2 Statické kompenzátory .....	8
1.4.3 Prosté kondenzátory .....	8
1.4.4 Chráněné kompenzační sekce .....	10
1.5 Způsoby řízení kompenzačního.....	12
1.5.1 Stupňovitě řízené kompenzátory .....	12
1.5.2 Plynule řízené .....	13
1.6 Charakteristika kompenzovaných spotřebičů a kompenzovaných sítí.....	15
1.7 Regulátory a měřicí přístroje.....	16
1.7.1 Regulátory jalového výkonu .....	16
2. Kondenzátory .....	18
2.1 Dielektrikum.....	18
2.1.1 Základní dielektrické materiály.....	19
2.2 Konstrukce kondenzátorů.....	21
2.2.1 Samoregenerace .....	21
2.2.2 Kondenzátory s papírovým dielektrikem .....	22
2.2.3 Kondenzátory MP .....	22
2.2.4 Kondenzátory MKV .....	22
2.2.5 Kondenzátory MKP.....	23
3. Návrh silnoproudých kondenzátorů .....	24
3.1 Elektrická kapacita .....	24
3.2 Elektrická pevnost .....	26
3.3 Ztráty v kondenzátoru .....	26
3.3.1 Ztráty v kovových částech.....	26
3.3.2 Ztráty v dielektriku .....	27
4. Tepelný výpočet kondenzátoru .....	29
4.1 Přenos tepla vedením .....	29
4.2 Přenos tepla prouděním.....	30
4.3 Přenos tepla sáláním.....	30
5. Návrh vnitřních pojistek kondenzátoru .....	32
5.1 Teorie vnitřního jištění kondenzátoru .....	32
5.1.1 Pojistky pro vnitřní jištění kondenzátorové baterie.....	33

5.2 Stanovení průměru tavného vodiče .....	33
5.3 Stanovení délky tavného vodiče.....	34
6. Vybíjení výkonových kondenzátorů .....	36
6.1 Podmínky určující vybíjení kondenzátoru .....	36
7. Popis současného stavu .....	38
8. Vlastní návrh kondenzátoru .....	40
8.1 Návrh rozměrů svitků a nádoby .....	40
8.2 Ověření oteplení kondenzátorového svitku .....	43
8.3 Dimenzování tavného vodiče .....	48
8.4 Dimenzování vybíjecích odporů .....	49
Závěr .....	50
Literatura .....	51

# Úvod

Než začneme řešit optimalizaci kompenzačního kiosku, vysvětlíme, co to je jalová energie, co ovlivňuje a čím ji můžeme potlačit. Popíšeme rotační a statické kompenzační zařízení. Probereme metody kompenzace.

Budeme se soustředit a návrh nového kompenzačního kondenzátoru o velikosti dle specifikace zadání společnosti Severočeské doly a.s. Popíšeme základní vlastnosti kondenzátoru, vysvětlíme co to je permitivita, seznámíme se s materiály používanými jako dielektrikum.

Po vysvětlení obecné teorie se vrhneme na samotný návrh svitkového kondenzátoru, provedeme kontrolu ohřívání kondenzátorového svitku, navrhne vnitřní pojistku a vybíjecí odpor.

V závěru práce dosadíme do vzorců a provedeme finální návrh kondenzátoru. Výsledky vyhodnotíme.



# 1. Rozbor problematiky kompenzace jalové energie

Jalový výkon byl nazýván rovněž výkonem nečinným či výkonem reaktivním. Již roku 1894 byla známa rovnice pro výpočet činného výkonu střídavého proudu.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.1) [10]$$

Byl znám vliv fázového posunu na hodnotu činného výkonu. Až počátkem 20. století byl definován pojem jalová energie a při zasedání IEC v Norsku v roce 1930 došlo k mezinárodní dohodě a stanovení jednotky jalového výkonu Var, později upravené do dnešní podoby var.

Výroba, přenos a rozvod a v neposlední řadě spotřeba elektrické energie jsou realizovány ve trojfázové střídavé soustavě. Pro provoz některých zařízení, ať už na straně elektrických sítí, nebo spotřebičů elektrické energie, je nutné vytvořit elektromagnetické nebo elektrické pole. To se vytváří buď vinutími (indukčností), nebo elektrodami (kapacitou). Na indukčnosti dochází k fázovému posunu proudu za napětím, na kapacitě se fázově opoždí napětí za proudem. Chování jednotlivých prvků elektrizační soustavy stejně jako spotřebičů elektrické energie je možné popsat jejich impedancí, která v sobě zahrnuje nejen složku činnou (ohmickou), ale i složku jalovou (induktivní nebo kapacitní).

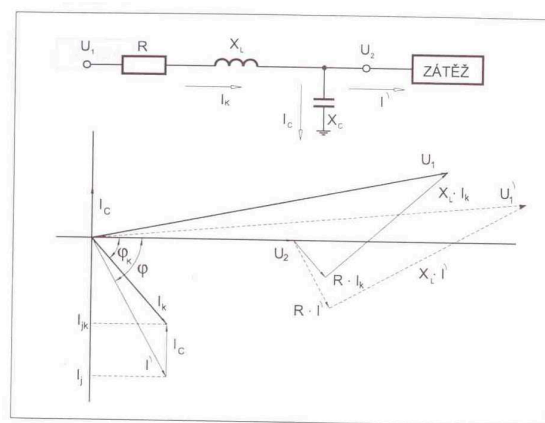
Jalovou je nazývána z toho důvodu, že energii do této impedance vloženou nelze nikterak zužít, ale přesto se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Při tomto přenosu však vznikají na jednotlivých prvcích přenosových a distribučních sítí ztráty, které jsou ve formě tepla uvolňovány do okolí. V některých případech se jeví jako velmi účelné vkládat do elektrických sítí další zařízení, obvykle kondenzátory, kterými se jejich charakter (a tedy i impedance) změní, a tím se ztráty částečně eliminují.

Kondenzátory připojené sériově ke spotřebičům mění charakteristiku sítě, zatímco kondenzátory připojené paralelně mění charakteristiku zatížení sítě.

## 1.1 Střídavá síť s paralelním kondenzátorem

Paralelní připojení kondenzátoru způsobí změnu fázoru proudu. Ve vektorovém diagramu je proud před kompenzací označen  $\vec{I}'$ . Ten se vlivem proudu  $\vec{I}_c$  protékajícího kondenzátorem sníží na proud  $\vec{I}_k$  kompenzované soustavy.

$$\vec{I}_k = \vec{I}' + \vec{I}_c \quad (1.2) [10]$$



**Obrázek 1: Střídavá síť s paralelním kondenzátorem [10]**

Za předpokladu, že se činný výkon nezmění, nastane rovněž změna fázového posunu za hodnoty  $\varphi$  na hodnotu  $\varphi_k$ . Pomocí těchto hodnot získáme takzvaný koeficient kompenzace  $k$ .

$$\frac{\tan \varphi_k}{\tan \varphi} = k \quad (1.3) [10]$$

Rozdílem koeficientu kompenzace získáme takzvaný stupeň kompenzace  $k_p$ :

$$k_p = 1 - k = \frac{I_j - I_{jK}}{I_j} = \frac{I_c}{I_j} = \frac{\tan \varphi - \tan \varphi_k}{\tan \varphi} \quad (1.4) [10]$$

Výkon kondenzátoru potřebný k požadované změně vypočteme:

$$Q_C = U \cdot I_C = U^2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_k) \quad (1.5) [10]$$

Ztráty ušetřené kompenzací:

$$\Delta P_{u\check{s}} = \Delta P - \Delta P_K = \frac{R}{U_S^2} \cdot [(P^2 + Q^2) - P^2 + (Q - Q_C)^2] = \frac{R}{U_S^2} \cdot [Q_C \cdot (2Q - Q_C)] \quad (1.6) [10]$$

Ztráty ušetřené kompenzací lze rovněž počítat v procentech:

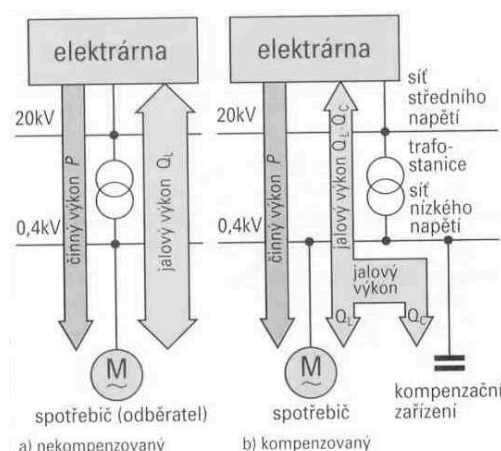
$$\Delta P_{u\check{s}\%} = (\Delta P - \Delta P_K) \cdot \frac{100}{\Delta P} = \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_K} \right) \cdot \cos^2 \varphi \cdot 100 = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_K} \right) \quad (1.7) [10]$$

Kompence má vliv rovněž na snížení velikosti úbytku napětí:

$$\Delta U_{\%} = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_K} \right) \quad (1.8) [10]$$

Snižování ztrát při přenosu elektrické energie pomocí paralelní kompenzace je jedním z nejdůležitějších a ekonomicky nejvýhodnějších opatření. Ostatní metody, jako například zvyšování průřezu vedení, zvyšování jmenovitého napětí apod., jsou ekonomicky méně výhodné a technicky často obtížně proveditelné.

Hlavním přínosem je, že kompenzace jalového výkonu snižuje zatížení generátorů a střídavé přenosové soustavy.



**Obrázek 2: Kompence jalového výkonu [18]**

## 1.2 Legislativa

Povinnost trvale kompenzovat jalový odběr elektrických zařízení uskutečňovaný s účinností jiným než  $\cos \varphi = 0,95_{\text{IND}}$  až  $\cos \varphi = 1,00_{\text{IND}}$  je každému odběrateli elektrické energie předepsána v následujících legislativních dokumentech

- Energetický zákon (Zákon č. 222/1994 Sb.) §15 odst. 4 písm. B
- Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 169/1995 Sb. § 6 odst. 2 písm. a)
- Ceník elektrické energie schválený Výměrem Ministerstva financí ČR č. 01/1998

Ustanovení těchto závazných dokumentů přebírají do svých „Podmínek dodávky elektrické energie“ všechny tuzemské rozvodné podniky a prostřednictvím svých provozně obchodních práv je uplatňují více či méně důsledně vůči všem odběratelům elektrické energie.

Kromě toho umožňuje Zákon č. 222/1994 Sb. ve svém § 39 Státní energetické inspekci (SEI) vyměřit odběratelům, kteří nedodržují podmínky uvedené v §15, pokutu až do výše 50 milionů korun.

Ve výjimečných případech (například při odběru realizovaném v těsné blízkosti energetické rozvodné stanice) je mezi dodavatelem a odběratelem dohodnuto jiné pásmo tzv. neutrálního účinníku, což platný zákon i prováděcí vyhláška umožňují (například  $\cos \varphi = 0,93_{\text{IND}}$  až  $\cos \varphi = 0,98_{\text{IND}}$ ). Obecně lze však říci, že každý odběratel je povinen jalový odběr kompenzovat.

Cenové přírázky za nedodržení předepsané úrovně  $\cos \varphi$  jsou stanoveny pro jednotlivé odběratele elektrické energie podle typu sazby a jsou uvedeny v procentech platby za výkon a elektrickou energii. V následující tabulce jsou uvedeny tyto přírázky tak, jak jsou obsaženy v ceníku elektrické energie.

Tabulka 1: Ceník za dodávku kompenzačního výkonu [10]

Rozsah tg $\varphi$ kvarh/kWh	$\cos \varphi$	Přírázka v %		Rozsah tg $\varphi$ kvarh/kWh	$\cos \varphi$	Přírázka v %	
		pro sazby A1, A2, B1, B2	pro ostatní sazby			pro sazby A1, A2, B1, B2	pro ostatní sazby
0,311 - 0,346	0,95	—	—	1,008 - 1,034	0,70	40,72	37,59
0,347 - 0,379	0,94	1,21	1,12	1,035 - 1,063	0,69	42,97	39,66
0,380 - 0,410	0,93	2,45	2,26	1,064 - 1,092	0,68	45,28	41,80
0,411 - 0,440	0,92	3,72	4,43	1,093 - 1,123	0,67	47,66	43,99
0,441 - 0,470	0,91	5,02	4,63	1,124 - 1,153	0,66	50,10	46,25
0,471 - 0,498	0,90	6,34	5,85	1,154 - 1,185	0,65	52,63	48,58
0,499 - 0,526	0,89	7,69	7,10	1,186 - 1,216	0,64	55,24	50,99
0,527 - 0,553	0,88	9,07	8,37	1,217 - 1,249	0,63	57,93	53,47
0,554 - 0,580	0,87	10,49	9,68	1,250 - 1,281	0,62	60,70	56,03
0,581 - 0,606	0,86	11,94	11,02	1,282 - 1,316	0,61	63,56	58,67

Současně s těmito přírážkami dává ceník distributorovi elektrické energie možnost účtovat tzv. nevyžádanou dodávku kapacitního kompenzačního výkonu, jinými slovy překompenzování.

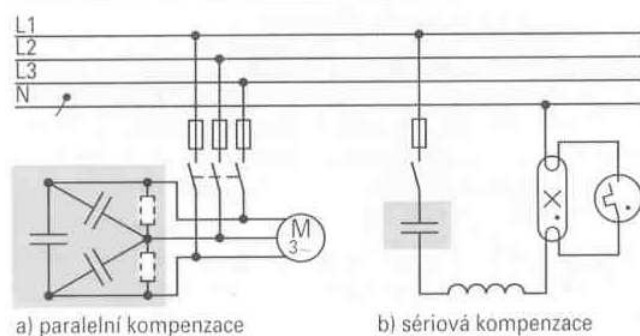
### 1.3 Druhy kompenzace

Kompenzaci lze provést i sériovým zařazením kondenzátoru, avšak z pohledu odběratele elektrické energie přichází v úvahu právě paralelní způsob. Využívají se tyto metody:

#### 1.3.1 Individuální - jednotlivá kompenzace

Kompenzační zařízení je v tomto případě připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Kompenzační kondenzátory musí být vybity během 60 sekund po jejich odpojení na bezpečné napětí (méně než 50 V).

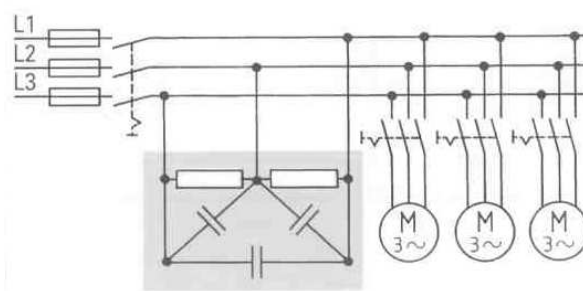
Od jalového výkonu je odlehčena celá elektrizační soustava od zdroje až po spotřebič. Úspory ztrát jsou nejvyšší, avšak využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzovaného zařízení. Používá se např. pro kompenzaci magnetizačního proudu asynchronního motoru a transformátorů, kompenzace zářivkových a výbojkových svítidel a tak dále.



Obrázek 3: Jednotlivá kompenzace [18]

### 1.3.2 Skupinová kompenzace

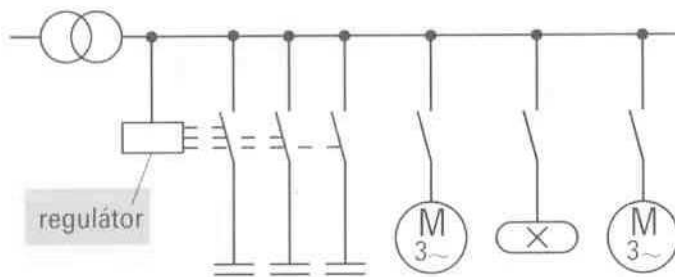
Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnících pro skupinu spotřebičů. Například je to kompenzace na hlavních rozváděcích vn/nn v rozvodech průmyslových podniků. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od tohoto rozvaděče ke zdroji. Vzhledem k soudobosti spotřebičů vycházejí kompenzační výkony menší a je nutná jeho regulace.



Obrázek 4: Skupinová kompenzace [18]

### 1.3.3 Centrální kompenzace

Provádí se v sítích s proměnlivou spotřebou různorodých spotřebičů, kompenzace je připojena na přípojnice vstupní trafostanice podniku. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon. Rovněž je nutná regulace a většinou je třeba řešit kompenzaci na úrovni vysokého napětí, což představuje vyšší náklady. Regulátor jalového výkonu zařazuje tolik kondenzátorů z baterie kondenzátorů, kolik je právě potřeba. Tento způsob kompenzace je vzhledem k centrálnímu připojení lehce kontrolovatelný a vhodný i při dodatečné instalaci.



Obrázek 5: Centrální kompenzace [18]

### 1.3.4 Kombinovaná kompenzace

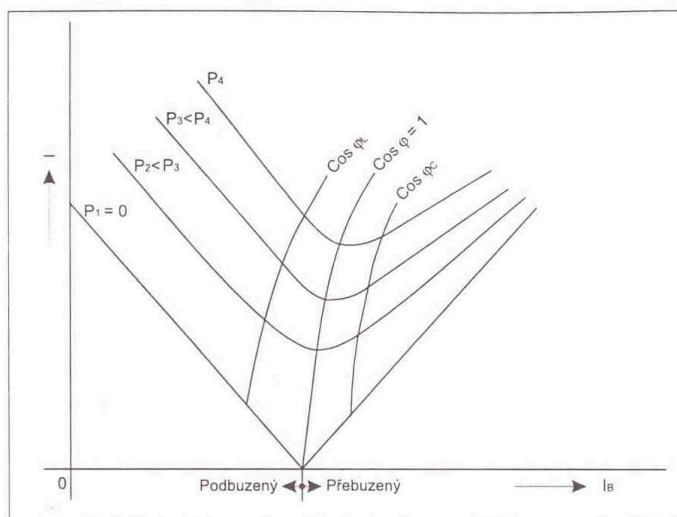
Kombinovaná kompenzace je logickou kombinací předchozích variant. Ve skutečnosti bývá poměrně dost rozšířena, zejména v rozsáhlých průmyslových sítích.

## 1.4 Základní rozdělení technických prostředků pro kompenzaci jalového výkonu

### 1.4.1 Rotační kompenzační zařízení

Mezi rotační kompenzační zařízení patří synchronní kompenzátory a synchronní motory. Synchronní elektrický stroj se vyznačuje zejména tím, že se mu magnetizační energie dodává samostatným budícím vinutím napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu.

Synchronní elektromotory se používají v aplikacích, kde lze očekávat poměrně stabilní zátěžný moment, tedy například pro pohony čerpadel, kompresorů, ventilátorů, rotačních pecí apod. Měníme-li velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí o stálém kmitočtu, je za předpokladu stálého zátěžného momentu stálý i činný výkon motoru. Změnou velikosti budícího proudu ale můžeme měnit účinník odběru motoru, a to jak v oblasti induktivní, tak i v oblasti kapacitní. Závislost proudu satoru na budícím proudu při stálém výkonu má tvar tzv. V-křivek.



Obrázek 6: V-křivky synchronního stroje [10]

K dosažení stálého účinníku při různém zatížení je třeba vhodným způsobem řídit budící proud. Regulátory, jimiž se synchronní motory často osazují, mohou zajistit chod motoru i při změnách činného zatížení buď s konstantním účinníkem, nebo s konstantním jalovým výkonem.

Těchto vlastností synchronních motorů lze velmi účelně využít ke kompenzaci jalového výkonu paralelně připojených spotřebičů. V případě, že je to ekonomicky zdůvodnitelné, jsou pro kompenzaci jalového výkonu používány synchronní kompenzátory. Jsou to vlastně synchronní motory pracující naprázdno, tedy s minimálním činným výkonem a relativně velkým rozsahem regulace jalového výkonu.

Synchronní stroje sloužící ke kompenzaci jalového výkonu jsou převážně konstruovány pro hladiny vysokého napětí – obvykle pro síť 6 kV. Přestože budící soupravy synchronních strojů tvoří moderní a velmi rychlé řízené usměrňovače, je i ve spojení s rychlými regulátory jalového výkonu odezva na potřebu změny jalového výkonu zatížena jistým zpožděním. Synchronní stroje jsou tedy zcela nevhodné ke kompenzaci spotřebičů, jejichž potřeba jalového výkonu se dynamicky mění, jako například u obloukových pecí, dynamicky řízených reverzačních stejnosměrných pohonů apod. V těchto případech dochází v době, než synchronní stroj díky zpoždění zvýší svůj kompenzační výkon, k nedekompenzování, zatímco ještě po jistou dobu, kdy již potřeba kompenzačního výkonu pominula, dále tento výkon dodává. To má negativní dopad na výsledné kolísání napětí.

Vzhledem k vysokým jednotkovým výkonům synchronních strojů (přibližně od 1 do 15 MVAR) a pomalejší regulaci jalového výkonu oproti jiným kompenzačním zařízením se tyto stroje využívají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. Připojují se k přípojnicím podružných průmyslových rozvodů 6 kV nebo přes samostatný transformátor 22/6 kV k přípojnicím hlavních rozvodů.

Kompenzace jalového výkonu pomocí synchronních strojů je v poslední době v útlumu. Provoz synchronních strojů je spojen se spotřebou činné energie, vyššími nároky na údržbu zařízení a v neposlední řadě vyššími nároky na obestavěný prostor a jeho vybavenost oproti kompenzačním zařízením statickým.

#### 1.4.2 Statické kompenzátory

Na rozdíl od rotačních kompenzátorů nejsou statické kondenzátory závislé na dodávce činné energie. V klasickém pojetí jsou tvořeny pasivními kompenzačními prvky, jako jsou výkonové kondenzátory.

#### 1.4.3 Prosté kondenzátory

Jedním z mnoha typů výkonových kondenzátorů je kondenzátor určený pro zlepšení účinnosti elektrických zařízení na střídavý proud. Je to kondenzátor, jehož použití vyžaduje zabezpečení zejména těchto tří hlavních požadavků:

1. tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu
2. odolnost proti přepětí
3. spolehlivost a bezpečnost provozu

Existují další typy výkonových kondenzátorů, jako vazební, impulsní, rázové, odrušovací, komutační a jiné. U nich se sleduje též odolnost proti velkým impulsním proudům, vlastní indukčnost, napěťová stabilita atd. Věnujme se však základním vlastnostem výkonových kondenzátorů určených pro kompenzaci jalového výkonu, z nichž hlavní je jalový výkon kondenzátoru při různých způsobech zapojení. Pro připojení na napětí má jednofázový kondenzátor jalový výkon  $Q_c$  podle vztahu:

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (1.9) [10]$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátoru

Úhlová rychlost:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.10) [10]$$

A z toho pak:

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad (1.11) [10]$$

kde I je efektivní hodnota proudu.

Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníka platí:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D \quad (1.12) [10]$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (1.13) [10]$$

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad (1.14) [10]$$

Analogicky pro zapojení kondenzátorů do hvězdy platí:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_Y \quad (1.15) [10]$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (1.16) [10]$$

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad (1.17) [10]$$

Podmínkou pro platnost předchozích výrazů je symetrie trojfázového zapojení, tj. stejné hodnoty všech kondenzátorů.

Kvalitu kondenzátorů výrazně ovlivňují ztráty. Ztráty sestávají z několika komponent, například ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů atd. Ztráty jsou reprezentovány tangentou ztrátového úhlu kondenzátoru  $\tan \delta$ . Ten udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinusovém napětí a kmitočtu. Celkové ztráty kondenzátoru můžeme stanovit z rovnice:

$$P_Z = Q_C \cdot \tan \delta \quad (1.18) [10]$$

pokud tedy vycházíme ze sinusového průběhu napětí. Tangenta ztrátového úhlu je rozdílná pro různé technologie výroby. Tangenta ztrátového úhlu rovněž závisí na teplotě, a to tak, že roste nejenom s rostoucí teplotou, ale i s teplotou klesající pod 0 °C.



Pro neharmonický průběh je třeba uvažovat ztráty pocházející od všech harmonických. Potom pro celkové ztráty kondenzátoru platí:

$$P_S = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \operatorname{tg} \delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.19) [10]$$

kde  $n$  je řád harmonické,  $U_n$  je napětí harmonické,  $f_n$  je kmitočet harmonické.

Velký vliv na životnost kondenzátorů má provozní teplota. Nadměrná teplota zrychluje elektrochemickou degradaci dielektrika. Velmi rychlé změny teploty mohou vyvolat degradaci částečnými výboji v dielektriku. Kde není možné zajistit vhodné podmínky chlazení, musí být použity kondenzátory speciální nebo s vyšším jmenovitým napětím.

Další významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost jejich impedance. Kapacitní reaktance  $X_C$ , která je jalovou složkou impedance, je dána vztahem:

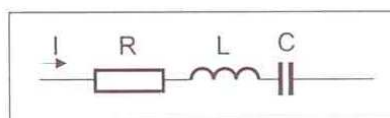
$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (1.20) [10]$$

Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se kmitočtem reaktance klesá. Připojíme-li tedy kondenzátor do sítě, kde budou kromě zdrojů proudu základního kmitočtu i zdroje harmonických, bude pro ně tento kondenzátor představovat velmi nízkou impedanci. Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem vlivem harmonických vzroste a tento proud bude přetěžovat jednak samotný kondenzátor, ale i části sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem.

Prosté kondenzátory lze použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích nízkého i vysokého napětí s malými úrovněmi energetického rušení, tj. v sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů nepřesahuje 10 až 15 % výkonu napájecího transformátoru.

#### 1.4.4 Chráněné kompenzační sekce

Základní zapojení kompenzačního obvodu lze redukovat na velmi jednoduchý sériový člen RLC.



Obrázek 7: Sériový RLC členek [10]

Je zřejmé, že součástky jsou schopny funkce v širokém spektru kmitočtů, v němž mají zvláštní postavení jmenovitý pracovní kmitočet  $f_n$  a rezonanční kmitočet  $f_r$ .

Pomocné veličiny:

Řád harmonické  $n$ , rezonance nastává při:

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad (1.21) [10]$$

Činitel zatlumení:

$$p = \frac{1}{n^2} \quad (1.22) [10]$$

Ochranné tlumivky se aplikují za podmínky, že  $X_L \ll X_C$ , takže:

$$X_L = -p \cdot X_C \quad (1.23) [10]$$

Činitel zatlumení  $p$  se udává buď v poměrných číslech bez jednotek, nebo v procentech. Je lhostejné, zda kompenzační kondenzátory jsou ve spojení Y nebo D, je však výhodné veškeré úvahy provést ve vztahu k napětí fázovému, a tedy počítat s fázovými reaktancemi kondenzátoru ( $X_{CN}$ ), fázovými reaktancemi tlumivek (jedna cívky  $X_{LN}$ ) a fázovým napětím  $U_{FN}$ . Pro běžné veřejné sítě je:

$$U_{FN} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V} \quad (1.24) [10]$$

Reaktance kompenzačního článku:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad (1.25) [10]$$

Reaktance kompenzačního článku (kondenzátoru s příslušnou ochrannou tlumivkou) je při  $f < f_r$  vždy nižší než výchozí reaktance kondenzátoru.

Kompenzační kondenzátory se u nás obvykle optimalizují na kmitočet  $f_N = 50 \text{ Hz}$  a napětí  $U_{CN} = 440 \text{ V}$ , čímž se respektuje i zvýšení napětí vlivem reaktance předřazených tlumivek nebo sítě. Hodnotu reaktance určíme z udané hodnoty reaktivního výkonu pro všechny fáze:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} \quad (1.26) [10]$$

Výkon kondenzátoru při jiném fázovém napětí:

$$Q_C = 3 \cdot U_F^3 \cdot \frac{1}{X_C} \quad (1.27) [10]$$

A při jiném kmitočtu ( $\omega_2$ ) a jiném napětí ( $U_2$ ):

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{U_2^2 \cdot \omega_2}{U_1^2 \cdot \omega_1} = Q_1 \cdot \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{f_2}{f_1} \quad (1.28) [10]$$

Tento vztah je možno použít například při přepočtu kompenzačního výkonu kondenzátoru, jehož jmenovitá hodnota napětí je jiná než napětí sítě.

Necelivá hodnota skutečného kompenzačního výkonu je v praxi nevýhodná, a proto výrobci kondenzátorů zavedli řadu kompenzačních kondenzátorů, které při zatlumení 7 % dávají celé číslo skutečného kompenzačního výkonu.

## 1.5 Způsoby řízení kompenzačního

### 1.5.1 Stupňovitě řízené kompenzátory

U stupňovitého řízení výkonů je důležitou otázkou volba počtu a velikostí stupňů. Tato otázka platí jak pro kompenzátory kontaktní, tak pro bezkontaktní na hladinách nízkého napětí i vysokého napětí. Volba počtu stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování, obvykle  $\cos \varphi \geq 0,95$ , neboli  $\tan \varphi \leq 0,33$ . Pak musí být, v ideálním případě a pro stupně se stejným kompenzačním výkonem, splněn vztah:

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \tan \varphi_0 \quad (1.29) [10]$$

kde  $Q_L$  je jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu  $P$ ,  $Q_{C1}$  je jalový výkon jednoho kompenzačního stupně,  $N$  je počet stupňů

Z předchozí nerovnosti je možno určit vztah pro součet stupňů kondenzátoru  $N$ :

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan \varphi_0}{Q_{C1}} \quad (1.30) [10]$$

#### 1.5.1.1 Kontaktní regulátory

Regulované kontaktní regulátory pracují na principu přímého připínání kondenzátorů nebo chráněných kompenzačních sekcí, popř. jejich skupin na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu.

Kontaktní kompenzátory s prostými výkonovými kondenzátory se běžně používají v sítích, kde se nevyskytují harmonické složky proudu a kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace.

Při použití klasických stykačů je jejich velkým nedostatkem možnost vzniku přechodných jevů při nedefinovaném kontaktním připojení kondenzátoru na síť. Velké proudové rázy mohou dosahovat až třicetinásobku hodnot jmenovitých proudů.

Další velkou nevýhodou kontaktních kompenzátorů způsobenou nesynchronním spínáním je vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv na napájecí síť. Často způsobují impulzní rušení citlivých elektromagnetických zařízení, měřicí a regulační techniky, elektronických vah, výpočetní techniky atd. Tyto nevýhody jsou částečně eliminovány předřazením ochranných tlumivek a zejména použitím moderních kontaktních prvků.

### 1.5.1.2 Bezkontaktní regulátory

Tam kde jsou kladeny vyšší nároky na rychlost změny jalového výkonu, je možno použít místo stykačů bezkontaktní spínače. Současně je nutno použít rychlejší regulátor jalového výkonu. Kondenzátorům se zde zpravidla předřazují ochranné tlumivky.

Rychlost regulace závisí na algoritmu, který používá regulátor jalového výkonu. V praxi je výhodné použít podobný regulační proces jako pro kompenzátory kontaktní. Připínání a odepínání jednotlivých stupňů kompenzátoru je pak podobné, pouze se děje podstatně rychleji.

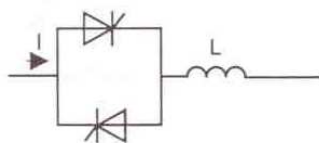
### 1.5.2 Plynule řízené

#### 1.5.2.1 Pasivní s dekompenzačními členy

Plynulé řízení jalového proudu je možné uskutečnit řízením proudu procházejícího tlumivkou. Použije-li se fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení, získáme základní zapojení výkonového obvodu.

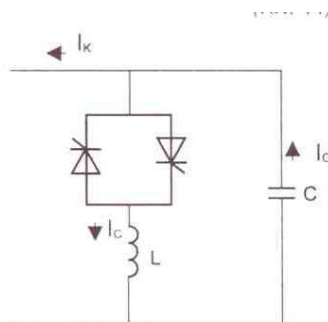
Tento pro jednoduchost jednofázový obvod umožňuje měnit čistě induktivní proud od nulové hodnoty až do plné hodnoty dané impedancí tlumivky  $L$ .

$$I_{L\max} = \frac{U_s}{\omega \cdot L} \quad (1.31) [10]$$



Obrázek 8: Fázové řízení proudu při induktivní zátěži [10]

Chceme-li řídit kapacitní proud, nelze použít fázově řízený spínač a tlumivku pouze nahradit kondenzátorem. Problémem jsou přechodové jevy. Řešení je však prosté, stačí, když se paralelně k původnímu obvodu spínače a tlumivky přidá kondenzátor, jako na následujícím obrázku:



Obrázek 9: Zapojení plynule řízeného kompenzátoru [10]

Je-li nyní  $I_C \geq I_L$ , potom výsledný kompenzační proud je:

$$I_K = I_C - I_L \quad (1.32) [10]$$

a má charakter kompenzačního proudu měnícího se v rozmezí  $0 \leq I_K \leq I_L$ .

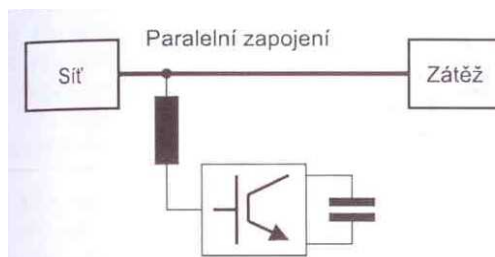
#### 1.5.2.2 Plynule řízené – aktivní

Aktivní filtry lze chápat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit na paralelní, sériové a kombinované.

#### 1.5.2.3 Paralelní aktivní filtr

Paralelní aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Je schopen odstranit nežádoucí harmonické proudy tím způsobem, že generuje shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Výsledný proud je potom zbaven zvolených harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě, a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží. Takto je možné v každém okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci. Generováním jalové složky první harmonické proudu je paralelní aktivní filtr schopen provádět velmi rychlou kompenzaci jalového proudu, popřípadě pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze tyto vlastnosti libovolně kombinovat.

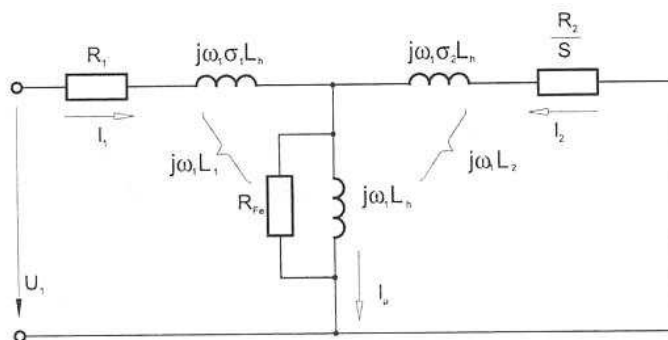
Generátor napětí či proudu může být tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT). Jedná se o shodné zapojení s můstkem střídače pro regulovaný pohon, to znamená, že ve třífázovém provedení obsahuje šest spínačů a zdroj proudu či napětí. V praxi se však osvědčil (podobně jako u frekvenčních měničů) typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátory. Vhodným spínáním tranzistorů můstku lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucích do filtru. Tento proud však obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence (jednotky až desítky kHz). Proto je nutné zařadit mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr pracující jako dolní propust.



Obrázek 10: Paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě [10]

## 1.6 Charakteristika kompenzovaných spotřebičů a kompenzovaných sítí

Asynchronní elektromotory jsou nejrozšířenějším spotřebičem elektrické energie, neboť zejména v průmyslových sítích tvoří přibližně 70 % celkového instalovaného výkonu. Dominantní zastoupení (zhruba 85 % instalovaného výkonu) mají v těchto 70 % asynchronní elektromotory s kotvou nakrátko.



Obrázek 11: Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru [10]

Je zřejmé, že fázor proudu statoru sestává ze složky činné a jalové, jejíž velikost závisí zejména na jalových složkách impedance statoru a rotoru a jalové složce tak zvané hlavní impedance charakterizující magnetický obvod elektromotoru.

Účinník odběru elektrické energie asynchronního motoru se při běžném provozu pohybuje mezi dvěma hodnotami danými provozním stavem naprázdno ( $I_2 = 0$ ) – v tomto případě se projevuje pouze statorová a hlavní impedance – a provozním stavem při zatížení ( $I_\mu = 0$ ) – v tomto případě se projevují impedance statorová a rotorová.

Při jmenovitém zatížení asynchronního motoru se jeho účinník odběru pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 podle velikosti výkonu motoru a počtu pólů. Obecně platí, že účinník při jmenovitém zatížení roste se zvyšujícími se jmenovitými otáčkami asynchronního elektromotoru (s klesajícím počtem pólů) a stejně tak roste se zvyšujícím se jmenovitým výkonem elektromotoru.

Účinník při chodu motoru naprázdno nebo při chodu motoru s nižším zatížením, než je zatížení jmenovité, je vždy horší než v případě chodu se jmenovitým zatížením.

U elektromotorů s vysokým jmenovitým výkonem je při návrhu individuální kompenzace nutno brát zřetel i na charakter poháněného zařízení, zejména co se týká rychlosti rozběhu a doběhu závislých na připojených setrvačných hmotách. Velkou roli také hraje způsob spouštění elektromotoru – přímé připojení na síť, přepínač hvězda-trojúhelník, rotorový spouštěč odporový nebo indukční, softstartér.

Individuálně připojené kompenzační kondenzátory je vhodné od výkonu cca 40 kVAR připojit ke svorkám elektromotoru zvláštním spínacím prvkem, nejlépe vhodně dimenzovaným stykačem se správně voleným zpožděním při spouštění elektromotoru a okamžitým odpojením kondenzátoru při vypnutí elektromotoru. Zabráni se tím nebezpečí vzniku přechodových jevů při spouštění elektromotoru, vzniku nebezpečných rezonancí při použití polovodičových softstartérů a v neposlední řadě vzniku zpětného napětí při doběhu elektromotoru.

V případě návrhu skupinové či centrální kompenzace v sítích, kde je dominantní spotřeba elektrické energie realizována v asynchronních motorech, je nutno brát v úvahu jejich součinitel soudobosti. Tím dojde k podstatné redukci navrženého kompenzačního výkonu.

U malých jednofázových asynchronních elektromotorů je zapotřebí počítat s ohledem na stabilně připnutý kondenzátor s účínkem blížícím se k jedné.

## **1.7 Regulátory a měřicí přístroje**

### **1.7.1 Regulátory jalového výkonu**

Velice důležitou částí kompenzátoru jalového výkonu je regulátor. Je zřejmé, že každý způsob kompenzace vyžaduje jiný typ regulátoru lišící se od sebe rychlostí reakce, vstupy a výstupy, principem zjišťování potřebného kompenzačního výkonu atd.

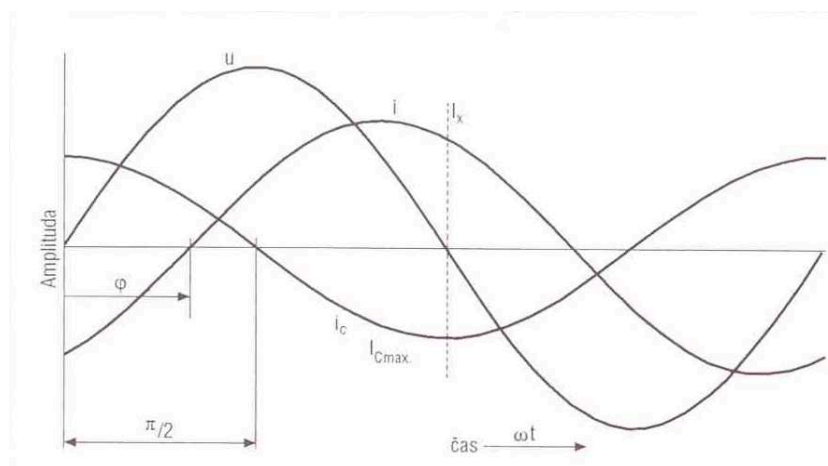
Regulátor, který se v praxi využívá nejvíce, je používán pro stupňovou kontaktní kompenzaci. Jedná se o podobný typ regulátoru, jako byl známý u nás pod označením RQ 5.

Tento regulátor je typickým představitelem regulátorů analogových. Analogové regulátory jsou postupně s rozvojem mikroprocesorové techniky nahrazovány digitálními, osazenými mikroprocesory. U mnohých regulátorů však zůstal způsob měření a vyhodnocování vstupních elektrických parametrů prakticky nezměněn a výhody jednočipových mikroprocesorů jsou využívány především k následným logickým operacím a ke zvýšení uživatelského komfortu. V přechodném období byly mnohdy násilně převáděny veličiny a spojitě regulační přímký do digitálních verzí, přestože obě veličiny zcela ztrácí fyzikální opodstatnění.

Většina i doposud vyráběných regulátorů pracuje na principu znázorněném na obrázku č. 12. Z křivky napětí jsou odvozeny průchody nulou a v těchto okamžicích je změřena hodnota proudu ( $I_N$ ). Lze snadno dokázat, že za předpokladu nezkresleného sinusového průběhu obou veličin je hodnota  $I_X$  hodnotou jalového proudu, tedy je roven  $I \cdot \sin \varphi$ , který je úměrný jalovému výkonu  $Q$ . Tento jednoduchý způsob zjišťování jalového výkonu má několik nevýhod. Podstatná nevýhoda, která prakticky znemožňuje použití regulátorů pracujících s touto metodou měření, je velká citlivost na deformace průběhu napětí i proudu. Při větších zkresleních napětí, ale zejména proudu, měří velice nepřesně a regulační povely jsou zmatené. Budí pak pocit, že regulátor je porouchaný.

Z principu vyplývá, že ke splnění základního účelu regulátoru nepotřebujeme znát velikost napětí, a proto lze napěťový obvod navrhnout na velice široký rozsah napětí – v některých případech až 1 : 10 – a využívat jej jen k určení průchodu nulou. Tato vlastnost je velice výhodná a má podstatný dopad na nižší cenu regulátoru.

Tyto regulátory se nedají použít v sítích s vysokým obsahem zkresleného měřeného proudu.



**Obrázek 12: Princip měření regulátoru jalového proudu [10]**

S rozvojem a zlevňováním mikroprocesorové techniky se objevily nové druhy regulátorů, které se při zachování ceny zbavily výše zmíněných nedostatků. Tyto regulátory už měří skutečné hodnoty napětí, proudů a výkonů, dokáží využívat regulačních algoritmů, které chrání kompenzovaný uzel sítě před okamžitým překompenzováním. Dále dokáží například provádět harmonickou analýzu proudu tekoucího do kompenzátoru a kompenzátor pak ochránit před přetížením proudy vyšších harmonických (zejména 5., 7., 11., 13.).

U nových regulátorů je realizován praktický poznatek, že váhové spínání kompenzačních stupňů (např. 1 : 2 : 4 : atd.) přináší jen provozní komplikace a teoreticky jemné odstupňování (např. 32 stupňů) je prakticky nevyužitelné. Pro většinou postačí 6 až 12 stupňů spínaných co nejehospodárněji s minimálním počtem operací.

Jedná se o spínání takzvané kruhové, což znamená, že vypíná vždy stupeň nejdéle zapnutý a naopak zapíná se stupeň nejdéle vypnutý. Tímto jednoduchým výběrem se většinou dosáhne rovnoměrného zatížení všech kompenzačních prvků a spínačů.

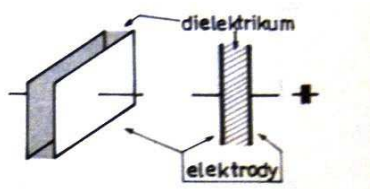
[10][18]



## 2. Kondenzátory

Kondenzátor je elektronická součástka, která je schopná po určitý časový interval hromadit a udržet (akumulovat) elektrický náboj a v jiném časovém intervalu jej dodat zpět do obvodu.

Kondenzátor se skládá ze dvou metalických ploch, které jsou vzájemně odizolovány pomocí nevodivého dielektrického materiálu, definovaného tloušťkou a permitivitou.



Obrázek 13: Kondenzátor [11]

Když je ke kondenzátoru připojen zdroj elektrického napětí, začne téci elektrický proud, který způsobí nabití desek kondenzátoru elektrickým nábojem, každá deska se nabíjí opačným nábojem. Tento děj probíhá do té doby, dokud napětí mezi deskami kondenzátoru je menší než napětí připojeného zdroje. Získaný náboj si kondenzátor udrží tak dlouho, dokud k jeho svorkám není připojena zátěž, přes kterou dojde k vybití.

Kapacita kondenzátoru  $C$  je mírou schopnosti pojmout a uchovávat elektrickou energii a je závislá na ploše desek, jejich vzdálenosti a parametrech dielektrika.

### 2.1 Dielektrikum

Pojem dielektrikum zavedl v roce 1839 Faraday, aby mohl definovat látku skrz, či podél které účinkují elektrické síly. Faraday rozdělil látky do dvou skupin:

Vodiče – látky, ve kterých nosiče elektrického náboje nejsou vázané a mohou se pohybovat při vystavení elektrickému poli.

Dielektrika – látky, ve kterých jsou nosiče elektrického náboje silně vázané. Elektrické pole nezpůsobí pohyb nosičů do dostatečné vzdálenosti. Neruší tedy účinek vnějšího elektrického pole a dle Faradovy představy uvnitř látky musí existovat elektrické pole. Ideální dielektrikum nevede stejnosměrný proud, v takovém případě se chová jako izolant. [2]

Základním parametrem dielektrika je permitivita  $\epsilon$ . Její význam spočívá v tom, že charakterizuje polarizovatelnost příslušného dielektrického materiálu, tedy že charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav dielektrika. Čím má permitivita větší hodnotu, tím je polarizovatelnost materiálu větší.

Permitivitu známe absolutní a relativní. Hodnota absolutní permitivity se v praxi používá pouze u vakua, kde plní roli základní hodnoty, vůči níž porovnáváme permitivitu ostatních materiálů. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  je bezrozměrná konstanta, která vyjadřuje, kolikrát je permitivita materiálu větší než permitivita vakua  $\epsilon_0$ , tedy kolikrát je větší polarizovatelnost dielektrika než polarizovatelnost vakua.

### 2.1.1 Základní dielektrické materiály

Jak bylo napsáno již dříve, dielektrikum je ze své podstaty izolant, jehož základní vlastností je, že nevede - respektive vede velice špatně elektrický proud. Takové vlastnosti najdeme u látek všech skupenství.

#### 2.1.1.1 Plynná dielektrika

Plyny se v konstrukci kondenzátorů příliš nepoužívají, až na několik výjimek.

##### Vzduch

Vzduch je nejčastěji používaný plynný izolant, s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 1,0006$  se velmi blíží vlastnostem vakua. Jako izolant se používá zejména u venkovního vedení, ale rovněž u vzduchových kondenzátorů.

##### Oxid uhličitý $\text{CO}_2$

Bezbarvý plyn je v porovnání se vzduchem významně těžší. Získává se při spalování koksu, anebo při termickém rozkladu vápence. Stlačený a odvlhčený se používá jako dielektrikum ve vysokonapětových kapacitních normálových kondenzátorech.

#### 2.1.1.2 Kapalná dielektrika

Kapalné izolanty a dielektrika mají v elektrotechnických zařízeních více úloh. Díky tekutosti a dobré tepelné vodivosti plní úlohu chladicího média. Pro svou poměrně vysokou elektrickou pevnost a rezistivitu se jeví jako dobré izolanty. Při správně provedené impregnaci pevné složky izolace, respektive dielektrického systému, zaplňují její póry a dutiny a zamezují vzniku částečných výbojů.

Kapalné izolanty a dielektrika dělíme do tří skupin

##### A) Minerální oleje

Minerální oleje se získávají při destilaci ropy a jsou směsí různých uhlovodíků. Všechny druhy olejů jsou do jisté míry citlivé na oxidaci, jejich životnost se prodlužuje syntetickými inhibitory.

Vlastnosti minerálních olejů jsou dány normou. Dalším nedostatkem minerálních olejů je jejich hořlavost, bod vznícení musí mít dostatečně vysokou hodnotu.

Kondenzátorový olej má zaručené hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele. Tento olej se neinhibuje, je určený pro impregnaci svítkových kondenzátorů. Jeho případné úpravy provádí až sám výrobce kondenzátorů.

##### B) Rostlinné oleje

Rostlinné oleje jsou z chemického hlediska směsí esterů, glycerínů a mastných kyselin. Jako kapalná dielektrika se používá ricínový olej, který není vysychavý. Je polární ( $\epsilon_r = 4-5$ ), ekologicky nezávadný a vyznačuje se odolností vůči působení stejnosměrného elektrického pole a částečných výbojů.

Vysychavé oleje jsou schopné tvořit pevné, pružné a tenké izolační vrstvy, které se teplem vytvrzují. Používají se pro výrobu elektroizolačních laků.

### C) Syntetické kapaliny

Tyto kapaliny se začaly vyrábět v třicátých letech minulého století, aby nahradily hořlavé minerální oleje těžko zápalnými kapalnými látkami. Snahou vývoje bylo nalezení takových druhů, které při požadovaných technických parametrech a přijatelné ceně zaručí požadovanou životnost a spolehlivost zařízení. Sledovaným parametrem je ekologická nezávadnost.

#### Polybutény

Vznikají polymerizací buténů, jsou to nepolární látky a v porovnání s minerálními oleji se vyznačují stabilitou při teplotách nad 100 °C. Jsou odolné vůči oxidaci a ekologicky nezávadné. Používají se jako impregnace papírové izolace a dielektrických systémů svitkových kondenzátorů, hlavně pro vysoké napětí.

#### Difenyly

Polychlordifenyly se vyznačují nehořlavostí a mimořádnou chemickou stabilitou. Používaly se jako náplň transformátorů a ve výkonových kondenzátorech. Mají vysokou relativní permitivitu, pro svou ekologickou škodlivost je dnes jejich používání zakázané.

Izopropyldifenyl je ekologicky nezávadný, používá se k impregnaci dielektrika výkonových kondenzátorů.

Kapaliny na bázi esterů nahrazují závadné polychlordifenyly, mají podobné vlastnosti, až na ekologičnost. Používají se jako změkčovadla plastů a impregnanty dielektrika svitkových kondenzátorů.

#### 2.1.1.3 Organická pevná dielektrika

##### Polypropylén (PP)

Je bezbarvá, průsvitná, houževnatá látka. Tavicí teplota je asi 165 °C. Umožňuje výrobu velmi tenkých biaxiálních fólií, které je možno pokovit. Je zdravotně nezávadný, odolává účinku plísní. Používá se ve svitkových kondenzátorech jako dielektrikum.

##### Polystyrén (PS)

Je čirá, průhledná látka. Ve formě fólie se používá na izolaci sdělovacích kabelů a jako dielektrikum kondenzátorů.

##### Elektroizolační papír.

Vyrábí se ze sulfátové buničiny. Nesmí obsahovat elektrolytické látky, bělidla, ani jiné přísady a barviva. Kondenzátorové papíry jsou určeny na výrobu dielektrických systémů svitkových kondenzátorů. Zpravidla jsou velmi namáhány tepelně a elektrickým polem. Vysoký důraz se klade na rovnoměrnost síly papíru a dodržení požadované měrné hmotnosti – od té se odvíjí hodnota relativní permitivity. Vyrábí se v tloušťkách 8 až 40 μm. Pro MP a MKP kondenzátory se vyrábí pokovený papír. Dielektrické vlastnosti kondenzátorového papíru se zlepšují impregnací.

Tabulka 2: tabulka vybraných vlastností elektroizolačních fólií [15]

Fólie	$\epsilon_r$ (-)	$\tan \delta$ (%)	$E_p$ (kV/mm)
polypropylén	2,3	0,07	300
polystyrén	2,5	0,02	200
polytetrafluoretylén	2,1	0,03	100
polyetyléntereftelát	3,3	0,20	300
polykarbonát	3,0	0,20	260
polysulfon	3,1	0,12	-
polyhydantion	3,3	0,15	250
polyamidimid	4,2	0,90	200
polyamid	3,5	0,20	270
triacetát celulózy	4,3	0,20	200
acetobutyráť celulózy	4,1	0,10	230

## 2.2 Konstrukce kondenzátorů

Obecně jsou kondenzátory rozděleny do dvou skupin dle konstrukčního řešení:

- a) kondenzátory s kovovou elektrodou
- b) kondenzátory samoregenerační:
  - 1. MKV
  - 2. MKP

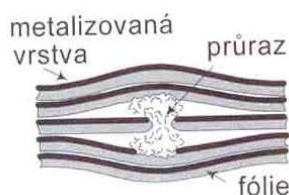
MKV znamená použití oboustranně pokoveného papíru, dielektrikem je polypropylenová (PP) fólie.

MKP znamená použití pokovené polypropylenové fólie s vyloučením papíru

Názvem samoregenerační se nazývají kondenzátory, které se vyznačují schopností izolovat místa, ve kterých došlo k průrazu dielektrika.

### 2.2.1 Samoregenerace

Tenká vrstva naneseného kovu na fólii zaručuje velmi dobré samoregenerační vlastnosti kondenzátoru. Ty spočívají v tom, že při náhodném průrazu dielektrika kondenzátoru dojde k lokálnímu odpaření kovové vrstvy v okolí místa průrazu a nedojde k tomu, že by se spojily opačně polarizované elektrody.



Obrázek 14: Lokální průraz kondenzátoru [2]

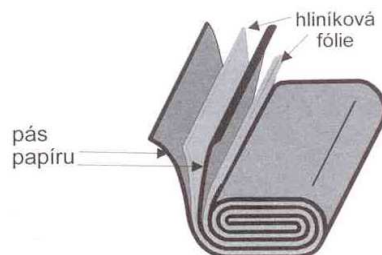
Zpravidla ani po několika regeneračních průrazech nedojde k dramatickému zhoršení elektrických parametrů kondenzátoru. Tím je podstatně zvýšena spolehlivost a životnost kondenzátorů.

Technologie samoregenerace umožnila konstrukci kondenzátorů s pouze jednou vrstvou dielektrika, čímž se značně zvýšily poměry  $kVAR \cdot dm^{-3}$  při zachování vysoké spolehlivosti.

### 2.2.2 Kondenzátory s papírovým dielektrikem

Dielektrikum tvoří papír ze sulfátové celulózy. Od běžného papíru se liší malou tloušťkou, velkou hustotou a velkou elektrickou pevností.

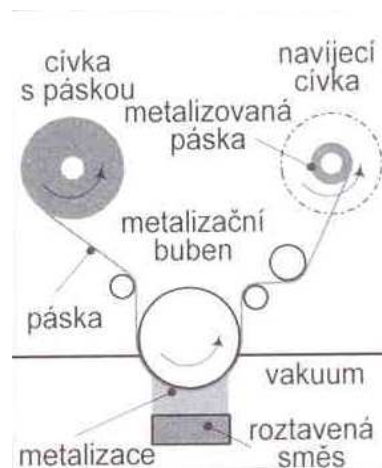
Elektrody kondenzátoru tvoří dvě hliníkové fólie. Ty spolu s dielektrikem v podobě papírového pásu jsou svinovány takovým způsobem, aby elektrody byly od sebe vždy izolovány a indukčnost kondenzátoru byla co nejmenší. Hotový kondenzátor je třeba zalít plastickým izolantem nebo umístit do pouzdra a zalít izolační hmotou. Jedná se o zastaralý typ.



Obrázek 15: Svitkový kondenzátor [2]

### 2.2.3 Kondenzátory MP

Dielektrikem je speciální kondenzátorový papír. Elektrody tvoří vrstva kovu, zinku nebo hliníku, napařená ve vakuu na jednu předem nalakovanou stranu kondenzátorového papíru. Kondenzátor tvoří dva takovéto pásy pokoveného papíru překrývající se celou plochou a svinuté do svitku. Oproti obyčejným kondenzátorům s papírovým dielektrikem dosahují vyšší spolehlivosti a jsou schopny samoregenerace.



Obrázek 16: Metalizace fólie [2]

### 2.2.4 Kondenzátory MKV

Dielektrický systém MKV kondenzátorů se skládá z oboustranně metalizovaného kondenzátorového papíru a minerálním olejem plně impregnované polypropylenové fólie. Hlavními přednostmi systému oproti klasickému dielektriku je především vysoká elektrická pevnost a nízké dielektrické ztráty. Takto vyráběné kondenzátory bývají značeny CLAKV.

### **2.2.5 Kondenzátory MKP**

Základem je jednostranně pokovený polypropylenový film, který má jeden izolační okraj. Svitky jsou realizovány navinutím dvou vrstev na izolační trubičku. Povrch polypropylenové fólie je velmi hladký, jednotlivé navinuté vrstvy k sobě přiléhají a tím je obtížné odstranit vzduch a svitek proimpregnovat kapalinou. Tyto kondenzátory jsou známy jako „suché“.

Při těchto vlastnostech je důležité pečlivé navíjení se stálým tahem a následné tepelné zpracování svitků, aby se docílilo co nejnižšího obsahu vzduchu. Ve vzduchových bublinách dochází k částečným výbojům, degradaci dielektrika a úbytku kapacity.

[2] [4]

### 3. Návrh silnoprůdých kondenzátorů

#### 3.1 Elektrická kapacita

Kapacita je základní vlastností kondenzátoru. Kapacita znamená schopnost hromadit a udržovat na elektrodách elektrický náboj v závislosti na napětí mezi elektrodami.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.1) [5]$$

Kapacita kondenzátoru závisí na jeho rozměrech, tedy na velikosti plochy elektrod a jejich vzdálenosti od sebe, a na typu dielektrika vyplňujícího tuto vzdálenost. Kapacita roste se zvětšováním ploch elektrod a s relativní permitivitou dielektrika, naopak klesá s rostoucí vzdáleností elektrod. Dle tvaru kondenzátoru se rozlišují základní druhy jako kulový, válcový a deskový. Deskový kondenzátor je geometricky nejjednodušší a jeho kapacita se určí dle vzorce:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (3.2) [5]$$

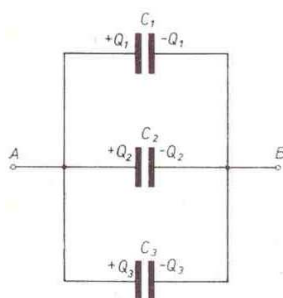
kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ )  
 $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika  
 $d$  je tloušťka dielektrika  
 $S$  je plocha elektrod

Svítkový kondenzátor, vyrobený navinutím elektrod včetně dielektrika na trn, má dvojnásobnou kapacitu, než by měl v případě elektrod uložených v rovině coby deskový kondenzátor. Kapacita svítkového kondenzátoru je definována vzorcem:

$$C_{sv} = 0,17708 \cdot \frac{\epsilon_r \cdot b_a \cdot l_a}{k \cdot d} \quad (3.3) [5]$$

kde 0,17708 reprezentuje dvojnásobek  $\epsilon_0$  ( $2 \cdot \epsilon_0 = 2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} = 0,17708 \cdot 10^{-10} \text{F} \cdot \text{m}$ )  
 $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika (-)  
 $b_a$  je šířka elektrody (mm)  
 $l_a$  je délka elektrody (mm)  
 $d$  je tloušťka dielektrika (mm)  
 $k$  je činitel stlačení dielektrika

Kondenzátory velkých kapacit se obvykle sestavují z několika paralelních kondenzátorových sekcí. Při paralelním řazení je na svorkách všech kondenzátorů stejné napětí  $U$  a náboje na nich jsou úměrné jejich kapacitám. Celková kapacita kondenzátorového bloku je dána součtem jednotlivým kondenzátorových sekcí:



Obrázek 17: Paralelní řazení kondenzátorů [5]

$$Q_1 = C_1 \cdot U; \quad Q_2 = C_2 \cdot U; \quad Q_3 = C_3 \cdot U \quad (3.4) [5]$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (3.5) [5]$$

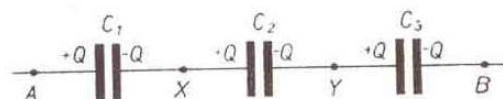
$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.6) [5]$$

Za podmínky  $C_1 = C_2 = C_3$  platí:

$$C = m \cdot C_1 \quad (3.7) [5]$$

kde  $m$  je počet paralelních kondenzátorů

Sériové zapojení použijeme v případě potřeby připojení kapacity k vyššímu než jmenovitému napětí. Připojíme-li několik sériově řazených kondenzátorů k baterii o napětí  $U$ , na každém z kondenzátorů se nahromadí stejně velký elektrický náboj  $Q$ . Napětí na jednotlivých kondenzátorech je závislé na jejich kapacitách:



Obrázek 18: Sériové řazení kondenzátorů [5]

$$U = \frac{Q}{C}; \quad U_1 = \frac{Q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}; \quad U_3 = \frac{Q}{C_3} \quad (3.8) [5]$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (3.9) [5]$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (3.10) [5]$$

Za podmínky  $C_1 = C_2 = C_3$  platí:

$$C = \frac{C_1}{n} \quad (3.11) [5]$$

kde  $n$  je počet kondenzátorů v sérii.



Často je používáno kombinace obou typů zapojení. Celková kapacita při sérioparalelním zapojení je za podmínky stejné velikosti kapacity jednotlivých kondenzátorů definována vztahem:

$$C = \frac{m}{n} \cdot C_1 \quad (3.12) [5]$$

### 3.2 Elektrická pevnost

Pro návrh kondenzátoru je velice důležitá hodnota elektrické pevnosti použitého dielektrika. Elektrická pevnost kondenzátoru je závislá na síle a kvalitě dielektrika. Elektrická pevnost je dána hodnotou intenzity elektrického pole  $E_p$ , což je poměr mezi průrazným napětím  $U_p$  a silou dielektrika  $d$ .

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (3.13) [5]$$

Jakmile dosáhne intenzita elektrického pole v dielektriku kritické hodnoty  $E_p$ , nastane průraz dielektrika, desky kondenzátoru se spojí nakrátko a kondenzátor ztratí svojí funkci.

Průraz pevných izolantů může být způsoben dvěma způsoby:

Tepelný průraz je způsoben prudkým poklesem elektrické pevnosti při zvýšení teploty, často způsobené nedostatečným odvodem tepla z kondenzátoru – chlazením.

Čistě elektrický průraz při překonání elektrické pevnosti dielektrika.

### 3.3 Ztráty v kondenzátoru

Každý kondenzátor připojený v elektrickém obvodu ztrácí elektrickou energii. Tato energie je spotřebovávána na ohřev kondenzátoru a ve formě tepla se vylučuje do okolí. Celkové ztráty energie za jednotku času reprezentují ztráty v dielektriku  $P_D$  a ztráty v kovových částech kondenzátoru  $P_K$ .

$$P = P_D + P_K \quad (3.14) [5]$$

#### 3.3.1 Ztráty v kovových částech

Tepelné ztráty v kovových částech kondenzátoru se dělí na

1. Ztráty ve fólii
2. Ztráty v přívodech, propojovacích vodičích, vývodech a pojistkách
3. Ztráty způsobené vibracemi elektrod

Při vyšších frekvencích se musí uvažovat také vliv skin efektu, který vyvolá zvýšení odporu vodičů oproti odporu měřenému při jednosměrném napětí. Elektrody kondenzátoru mají obvykle malou tloušťku a vliv skin efektu je možno u nich pozorovat až při nejvyšších frekvencích.

Proud procházející kondenzátorem je nepřímo úměrný reaktančnímu odporu kondenzátoru:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (3.15) [5]$$

Kondenzátor klade střídavému proudu tím větší odpor, čím menší má kapacitu a čím je menší frekvence. Pak proud tekoucí kondenzátorem je dán výrazem:

$$I = \frac{U}{X_c} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U \quad (3.16) [5]$$

Pro výpočet výkonu spotřebovaného na zahřátí elektrod u namotávaných svitkových kondenzátorů se skrytou fólií při umístění vývodů na konci a na začátku fólie lze použít rovnici:

$$P_{kf} = \frac{2}{3} \cdot I^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{b \cdot h} \quad (3.17) [5]$$

Jestliže jsou vývody umístěny uprostřed svitku, pak výkon ztracený v kovových částech (ve fólii) se sníží čtyřnásobně a je dán vztahem:

$$P_{kf} = \frac{1}{6} \cdot I^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{b \cdot h} \quad (3.18) [5]$$

Pro výpočet výkonu ztraceného na ohřev kovových částí, tj. přívodů, propojovacích vodičů, vývodů a pojistek, je možné použít vztah:

$$P_{kv} = I^2 \cdot R_v \quad (3.19) [5]$$

Proud procházející kondenzátorem je úměrný frekvenci, proto výkon ztracený v kovových částech kondenzátoru vzrůstá s druhou mocninou frekvence a při vysokých frekvencích představuje základní část ztrát v kondenzátoru. Musíme se vyvarovat zejména výskytu vyšších harmonických.

Vlivem střídavého elektrického pole, které vyvolává střídajícím se přitahováním a oddalováním polepů jejich vibrace, může dojít k vzrůstu ztrát energie v kondenzátoru, zvláště při vyšších frekvencích. Pro odstranění ztrát vibracemi elektrod v kondenzátorech je třeba zabezpečit dostatečně silné spojení kondenzátorových svitků.

### 3.3.2 Ztráty v dielektriku

Ztráty v dielektriku známe:

1. Ztráty dipólem a vodivostí iontů v dielektriku
2. Ztráty dipólem a vodivostí iontů v impregnaci
3. Ztráty ionizací ve vzduchových dutinkách dielektrika
4. Ztráty ionizací ve vzduchových dutinkách u okrajů elektrod

Odpor dielektrika není nikdy nekonečný, protože v dielektriku se vždy nachází malé množství volných nábojů, které se mohou pohybovat od jedné elektrody k druhé a projeví se jako vodivost dielektrika. Dielektrikem protéká vodivostní proud, který způsobuje Joulovy ztráty. Dielektrikum se zahřívá, ale při jeho vyšší teplotě stoupne jeho vodivost, až dojde k ustálení v rovnovážném stavu mezi teplem generovaným a teplem vydaným do okolí.

Ke ztrátám energie v dielektriku přispívají ztrátové polarizace, při kterých se elektrická energie spotřebovaná na polarizaci přeměňuje při depolarizaci na teplo. V silových kondenzátorech s dielektrikem vznikají polarizace:

- Elektronová
- Dipólová
- Mezivrstvá

Velikost ztrát vznikajících polarizací v dielektriku je číselně vyjádřena permitivitou. Celkové ztráty v dielektriku jdou určeny vzorcem:

$$P_D = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.20) [5]$$

Kde  $\operatorname{tg} \delta$  je ztrátový činitel. Vzhledem k požadovaným parametrům kondenzátoru se snažíme dosáhnout co nejnížší možnou hodnotu tohoto činitele. Z předchozího vzorce je jasně patrná přímá závislost mezi  $\operatorname{tg} \delta$  a velikostí dielektrických ztrát.

[5]

## 4. Tepelný výpočet kondenzátoru

Spolehlivost výkonových kondenzátorů úzce souvisí s jejich tepelným režimem, protože i nevelký zdroj tepla může uvnitř kondenzátoru způsobit výrazné navýšení teploty svítka. To může vést k poruše a odstavení kondenzátoru z provozu. Teplo je třeba z kondenzátoru odvést. Pokud se v tělese naleznou dvě místa o různých teplotách, mluvíme o teplotním gradientu, začne proudit teplo z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou, výjimku tvoří sálání, kdy energii vydává každé těleso s teplotou vyšší než 0 K. K šíření tepla dochází nezávisle na skupenství tělesa, pouze se změní způsob.

Způsoby šíření tepla:

1. Vedením uvnitř pevných či navzájem se dotýkajících těles - kondukce
2. Prouděním v tekutinách - konvekce
3. Sáláním vyzářená energie těles - radiace

### 4.1 Přenos tepla vedením

Uvnitř pevných těles nebo v jejich těsném dotyku dochází k přenosu tepla vedením. Molekuly každé látky jsou v neustálém pohybu, jejich energie je přímo závislá na teplotě. Při srážkách molekul se pohybová energie předává molekulám s menší kinetickou energií a tím dochází ke sdílení tepla vedením.

Teplo, které projde tělesem, závisí na tepelné vodivosti látky, na délce a ploše, kterou teplo prochází a na teplotním gradientu. Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo a je vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$ .

Prostup tepla rovinou stěnou tloušťky  $l$  o ploše  $S$ , se součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  a rozdílem teplot mezi stranami desky  $\Delta \vartheta$  je určen:

$$Q = \frac{\lambda}{l} \cdot S \cdot \Delta \vartheta \quad (4.1) [7]$$

z čehož je odvozena tepelná propustnost:

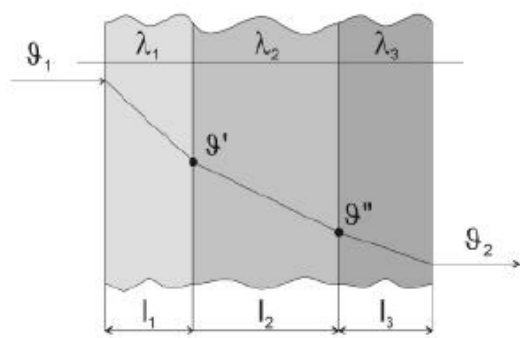
$$\Lambda = \frac{\lambda}{l} \quad (4.2) [7]$$

Převrácená hodnota tepelné propustnosti je tepelný odpor

$$R_{th} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{l}{\lambda} \quad (4.3) [7]$$

Prostup tepla rovinou je pak možno určit:

$$Q = \Lambda \cdot S \cdot \Delta \vartheta = \frac{S \cdot \Delta \vartheta}{R_{th}} \quad (4.4) [7]$$



Obrázek 19: Přenos tepla složenou rovinnou stěnou [16]

## 4.2 Přenos tepla prouděním

Proudění tepla nastává v tekutinách (kapaliny a plyny) za podmínky teplotního rozdílu v různých místech. Přírozené proudění nastane pohybem teplých částic s menší měrnou hmotností směrem vzhůru a chladnějších těžších částic směrem dolů. Teplo je přenášeno pohybem částic. Tepelný tok je možné zvýšit nuceným prouděním.

Proudění tepla je zpravidla spojeno s přestupem tepla mezi tekutinou a pevnou látkou. Množství tepla, které přestoupí ze stěny do proudící tekutiny, je dáno součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ .

Tepelný tok mezi pevnou látkou a tekutinou je určen:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta \vartheta \quad (4.5) [7]$$

## 4.3 Přenos tepla sáláním

Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K vysílá stále všemi směry energii ve formě tepelného záření. Na těleso současně dopadá tepelné záření od jiných těles z okolí. Tok energie dopadající na těleso lze rozdělit na tři části:

- Odražený tok
- Prostupující tok
- Pohlčený tok

Pohltivost je poměr tepla pohlčeného k teplu sdílenému sáláním:

$$\varepsilon = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (4.6) [7]$$

Odraznost je poměr tepla odraženého k teplu sdílenému sáláním:

$$\zeta = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (4.7) [7]$$

Průzračnost se vyskytuje velice vzácně a u kovů se proto dá tvrdit, že:

$$\varepsilon + \zeta = 1 \quad (4.8) [7]$$

Hustota záření  $q$  sálajícího povrchu černého tělesa o absolutní teplotě  $\Theta$  je dána Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$q = \sigma \cdot \Theta^4 \quad (4.9) [7]$$

kde  $\sigma$  je součinitel sálání černého tělesa – Stefan-Boltzmannova konstanta:

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Pro potřeby praxe (šedé těleso) je pak předchozí vzorec uzpůsoben:

$$q' = \varepsilon \cdot q = C \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{\Theta}{100} \right)^4 \quad (4.10) [7]$$

$$\text{kde } C = \sigma \cdot 10^8 = 5,6697 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Tepelný tok vyzářený šedým tělesem je pak dán:

$$\Phi = C \cdot \varepsilon \cdot S \cdot \left( \frac{\Theta}{100} \right)^4 \quad (4.11) [7]$$

Základní myšlenkou je při provozním stabilním stavu odvést stejné množství tepla, jako se vyprodukuje.

$$P = \sum Q \quad (4.12) [7]$$

Pro úspěšný výpočet je třeba definovat si počáteční podmínky:

1. Budeme počítat chlazení jednoho ze středních svitků. Ten je ze dvou stran obklopen dalšími svitky o stejné teplotě, tudíž zde nemáme teplotní gradient a teplo není těmito deskami odváděno.
2. Předpokládáme, že stěny kondenzátorové baterie mají dostatečnou plochu, aby byly schopny vyprodukované teplo odvést. Případné přídatné chladicí plochy a jejich velikost budou navrženy právě s ohledem na uchlazení kondenzátoru.
3. Vzhledem k poměru plochy a tloušťky stěn zanedbáme vliv hran a rohů na hranicích stěn kondenzátorové baterie.
4. Pro potřeby ověření teplotní stability kondenzátoru nás nezajímají průběh ohřevu na provozní teplotu ani chladnutí po odepnutí kondenzátoru z elektrické sítě.
5. Výpočet musíme provést metodou, která přihlédne k možnosti nerovnoměrného tepelného toku jednotlivými plochami – metoda tepelných odporů.

[7] [16]

## 5. Návrh vnitřních pojistek kondenzátoru

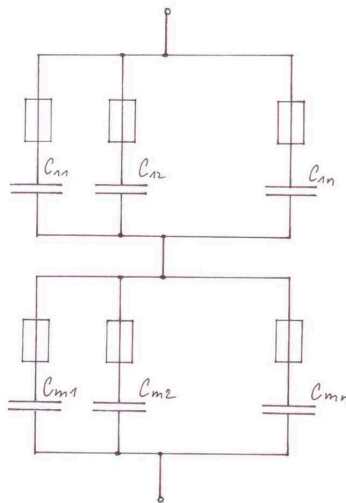
Při defektu svitku v nejištěné kondenzátorové baterii dochází ke zkratování celé paralelní sekce a následnému poklesu celkového výkonu kondenzátorové baterie, případně může být vlivem poruchy zničena celá kondenzátorová baterie. Porušení sekce může též vyvolat roztržení vlastní nádoby kondenzátorové baterie a následně poškodit i další kondenzátorové jednotky. Výskytu zkratů v dielektriku nelze spolehlivě zamezit, lze však jejich důsledky omezit.

Optimálně se jeví vnitřní jištění všech svitků kondenzátorové baterie. V případě defektu svitku pojistka vadný element odpojí a zbylé svitky paralelní sekce zůstávají v provozu. Snížení celkového výkonu je zanedbatelné a snížení životnosti kondenzátorové baterie se neprojeví. Je zde výrazný ekonomický efekt, prodlouží se takto životnost kondenzátorové baterie a v případě rozsáhlejšího defektu může kondenzátorová baterie pracovat se sníženým výkonem, než může být nahrazena.

V případě sériově řazené sekce je vcelku zbytečné jistit každý svitek zvlášť, protože odpojení jednoho svitku by znamenalo odpojení celé sekce. Shledávám zde jako výhodnější jistit celou sériovou sekci společně. V případě malých defektů přichází ke slovu samoregenerace.

### 5.1 Teorie vnitřního jištění kondenzátoru

Počet sériově řazených skupin  $m$  je závislý na výkonu a napětí kondenzátorové baterie. Počet paralelních svitků v sekci  $n$  je kompromisem mezi požadavky optimálního elektrického zapojení a požadavky výroby. Vyšší počet paralelních sekcí má za následek nižší stupeň degenerace materiálů pojistek vlivem rekrystalizace při průchodu provozních proudů a nižší proudové namáhání zbylých svitků sekce po odpojení defektního svitku. Z ekonomických důvodů se výrobci snaží minimalizovat počet svitků.



Obrázek 20: Vnitřní jištění kondenzátoru

Základní myšlenkou vnitřního jištění kondenzátorové baterie je předpoklad nízkého výskytu zkratů v dielektriku, způsobených nehomogenitami. Protože svitky jsou vzhledem k porušenému svitku zkratovány, dochází k výraznému narůstání proudu porušenou sekcí a proud  $I$  je tak velký, aby pojistku uvedl do činnosti během několika period. Porušení paralelní sekce způsobí vždy

prakticky okamžité roztavení pojistky zapojené v sérii s porušeným svítkem a uhasí elektrický oblouk v porušené sekci.

### 5.1.1 Pojistky pro vnitřní jištění kondenzátorové baterie

Pojistka musí odolat všem možným provozním stavům kondenzátorové baterie a být schopna odpojit defektní svítek po průrazu v jeho dielektriku. Pojistka musí být navržena tak, aby minimální energie  $W$  postačovala s dostatečnou rezervou na její přetavení.  $W_{\min} > W_{p1}$ , kde  $W_{p1}$  je energie potřebná k přepálení pojistky.

V souladu s požadavkem, aby pojistka vypnula pouze při průrazu jí jištěného elementu, musí být maximální hodnota energie akumulované v pojistce během jejího působení menší než energie potřebná k přepálení nové pojistky jedním proudovým výbojem. V případě, že by tato podmínka nebyla splněna, mohla by pojistka reagovat i na běžné provozní namáhání.

Pojistky při opakovaném namáhání tavného vodiče stárnou. Průchodem proudů provozních, které se blíží krajnímu proudu pojistky, dochází k rekrystalizaci materiálu tavného vodiče a následnému znehodnocení některých jeho vlastností. Je vhodné věnovat pozornost oteplení pojistek provozními proudy vzhledem k materiálovým vlastnostem tavného vodiče pojistky.

Při průrazu svítku se na přepálení pojistky podílí vedle poruchového proudu tekoucího pojistkou poškozeného svítku také energie akumulovaná ve zbylých nepoškozených svítcích dané zkratované sekce.

Energie akumulovaná v jedné sekci o  $n$  paralelních větvích:

$$W_{aku} = \frac{U_{sv}^2 \cdot C_{sv} \cdot n}{2} \quad (5.1)$$

Z této energie je pojistkou pohlcena pouze část v poměru určeném podílem odporu pojistky jistící kondenzátorový svítek vzhledem k odporu celé proudové smyčky. Zbytek energie se spotřebuje v přívodech, defektním svítku, atd.

Zdola je volba průměru tavného vodiče pojistky omezena jednak odolností vůči provozním proudům tekoucím pojistkou nepoškozeného svítku, jednak předpisy IEC. Kondenzátor musí vyhovět požadavkům zkoušky vybíjením do zkratu – kondenzátor musí vydržet opakované vybití do zkratu a to pětkrát během deseti minut. Energie akumulovaná v sekcích musí při této zkoušce způsobit přetavení vnitřních pojistek. Jako tavný vodič se standardně používá pocínovaný měděný vodič konstantního průřezu.

### 5.2 Stanovení průměru tavného vodiče

Tepelná kapacita vodiče musí být taková, aby uvolněná energie při zkoušce vybíjením do zkratu nezpůsobila jeho přetavení. Pro stanovení minimálního průřezu tavného vodiče pojistky vycházíme z předpokladu, že pojistka bude působit rychle - nemusíme tak počítat odvod tepla z pojistky.

Průběh funkce pojistky má tři stádia. Nejprve se vodič ohřeje na teplotu tavení ( $W_1$ ), pak dojde k přetavení ( $W_2$ ) a následně odpaření materiálu vodiče ( $W_3$ )



$$W_{cel} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (5.2)$$

$$W_1 = V \cdot c \cdot \Delta \vartheta = V \cdot c \cdot (\vartheta_{tav} - \vartheta_0) \quad (5.3)$$

$$W_2 = V \cdot l_t \quad (5.4)$$

$$W_3 = k_0 \cdot V \cdot l_v \quad (5.5)$$

kde V je objem vodiče, c je objemová tepelná kapacita,  $\vartheta_0$  je výchozí teplota,  $\vartheta_{tav}$  je teplota tavení,  $l_t$  je skupenské teplo tání,  $l_v$  je výparné teplo a  $k_0$  je koeficient odpaření.

$$W_{cel} = V \cdot (c \cdot \Delta \vartheta + l_t + k_0 \cdot l_v) \quad (5.6)$$

Objem vodiče je:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad (5.7)$$

kde l je délka vodiče, d je průměr vodiče.

Energie kondenzátorového článku je dána vztahem:

$$W'_c = 0,5 \cdot (n-1) \cdot C_{sv} \cdot (1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{sek})^2 = 1,44 \cdot (n-1) \cdot C_{sv} \cdot U_{sek}^2 \quad (5.8)$$

kde n je počet paralelních sekcí,  $C_{sv}$  je kapacita jednoho svitku,  $U_{sek}$  je napětí sekce kondenzátorové jednotky s 20% bezpečnostní rezervou.

$$d_{min} = I_k^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot \alpha \cdot \vartheta_{tav}}{4 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.9)$$

Musíme zvolit  $d > d_{min}$ , z důvodu omezení vlivu rekrystalizace na průběh tavné charakteristiky je nutné zvolit průměr s dostatečnou rezervou (vyšší).

### 5.3 Stanovení délky tavného vodiče

Rovnice tepelné rovnováhy

$$R \cdot I^2 = \alpha \cdot A \cdot \vartheta + c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (5.10)$$

kde R je odpor vodiče, I je proud protékající vodičem,  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla, V je objem vodiče,  $\vartheta$  je teplota vodiče.

Levá strana rovnice je dána tepelným výkonem Joulových ztrát, vznikajících v tavném vodiči průchodem proudu. Pravá strana představuje tepelný výkon odvedený plochou tavného vodiče do okolí a výkon spotřebovaný na vlastní ohřev tavného vodiče.

$$\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha \cdot A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5.11)$$

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha \cdot A} \quad (5.12)$$

Vyjdeme-li z krajního proudu jako proudu, který svým průchodem vyvolá zapůsobení pojistky v čase  $t$  konvergujícím k nekonečnu, pak po dosažení za  $t$  dostaneme:

$$I_{KR} = \frac{\sqrt{\vartheta_{lav} \cdot \alpha \cdot A}}{R} \quad (5.13)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5.14)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (5.15)$$

$$A = \pi \cdot d \cdot l \quad (5.16)$$

$$I_{KR} = \frac{\sqrt{\pi \cdot \vartheta_{lav} \cdot \alpha}}{4 \cdot \rho} \cdot d \quad (5.17)$$

Nahromaděná energie „zdravých“ svitků  $W_c$  způsobí přetavení tavného drátu pojistky

$$W_c = W_{cel} \quad (5.18)$$

A pro délku tavného vodiče pojistky platí:

$$l = 3,67 \cdot \frac{k \cdot 0,5 \cdot (n-1) \cdot C_{SV} \cdot U_{sek}^2}{d^2 \cdot (c \cdot \Delta \vartheta + l_t + k_0 \cdot l_v) \cdot \gamma} \quad (5.19)$$

[12]

## 6. Vybíjení výkonových kondenzátorů

Kondenzátor má schopnost hromadit elektrický náboj. Připojíme-li na svorky kondenzátoru napětí, nabije se. Po odpojení zdroje zůstává na svorkách napětí a kondenzátor zůstává nabitý. Napětí na jeho svorkách velmi pomalu klesá vlivem samovybíjení v závislosti na kvalitě dielektrika. Pro kondenzátor je žádoucí, aby dielektrikum mělo co možná nejvyšší svodový odpor, a proto napětí na jeho svorkách zůstává po dlouho dobu, třeba i několik dní. Totéž platí i o kondenzátorech v provozu. Po odpojení z elektrické sítě zůstává kondenzátor nabit, na jeho svorkách je napětí úměrné napětí sítě v čase odpojení. Takovýto stav není žádoucí hned ze dvou důvodů.

Prvním je bezpečnost pracovníků, neboť s běžnou údržbou se začíná zpravidla několik minut po odpojení od sítě. Je nebezpečí, že by se pracovník mohl neúmyslně dotknout svorkovnic a mohlo by dojít k úrazu elektrickým proudem se závažnými důsledky, v nejhorším případě ke smrti.

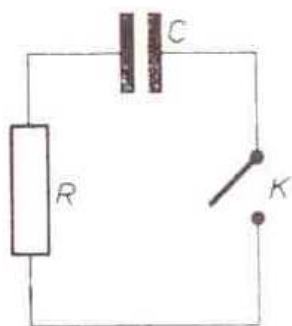
Druhým důvodem je situace, kdy při opakovaném sepnutí kondenzátoru během krátké doby nastane rychlé vybití přes připojená zařízení, která by se mohla poškodit. Je proto nutné zajistit, aby elektrický náboj kondenzátoru byl vybit v přiměřeném časovém intervalu po odpojení od sítě. Vybití je možno provést několika způsoby:

1. vybití přes spotřebič, ke kterému je připojen
2. vybití přes vinutí transformátoru
3. vybití pomocí tlumivek pro vybíjení
4. vybití pomocí pevně připojených odporů
5. vybití pomocí odporu, který se po odepnutí kondenzátoru ze sítě připojí na svorky kondenzátoru

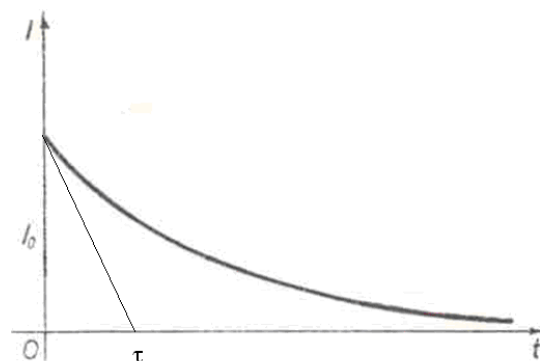
### 6.1 Podmínky určující vybíjení kondenzátoru

Dle normy ČSN 35 8205 se za kondenzátory vybíjené vyhovujícím způsobem považují takové, které jsou připojeny k ostatním elektrotechnickým zařízením tvořícím vybíjecí obvod přímo, bez vypínače, pojistek nebo jakéhokoli vloženého přerušovače.

Nejsou-li tyto podmínky splněny, musí být kondenzátorová souprava opatřena zařízením schopným snížit napětí na kondenzátoru po odpojení od sítě na napětí 50 V nebo nižší, a to do jedné minuty pro jmenovité napětí  $U_n$  do 600 V, nebo do pěti minut pro kondenzátor s  $U_n > 600$  V.



Obrázek 21: Vybíjení kondenzátoru přes odpor [1]



Obrázek 22: Časový průběh vybíjení kondenzátoru [1]

Při sepnutí kontaktu k se náboj  $Q$ , který byl nashromážděn na kondenzátoru v momentě jeho vypnutí od elektrické sítě, začne vybíjet přes odpor  $R$ . Kondenzátor se chová jako zdroj elektrické energie, která se na odporu přeměňuje na teplo.

Pro rychlost vybíjení je důležitá časová konstanta  $\tau$ , graficky vyjádřená tečnou k exponenciále v grafu s průběhem proudu při vybíjení. Jelikož odpor má pouze činnou složku, jsou napětí a proud ve fázi.

$$\tau = R \cdot C \quad (6.1) [5]$$

Časový průběh vybíjení je určen následovně:

$$q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (6.2) [5]$$

kde  $q(t)$  je zbytkový náboj,  $Q_0$  je náboj na začátku vybíjení.

Úměrně tomu je dáno napětí na odporu a následně pomocí úprav získáme hodnotu vybíjecího odporu:

$$u_r(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (6.3) [5]$$

$$\frac{u_r(t)}{U_0} = e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (6.4) [5]$$

$$\text{Když } U_0 = \sqrt{2} \cdot U_N \quad (6.5) [5]$$

$$R = \frac{t}{3 \cdot C \cdot \ln \frac{\sqrt{2} \cdot U_N}{u_r(t)}} \quad (6.6) [5]$$

$$\text{Když } Q = 3 \cdot U^2 \cdot C \cdot \omega \quad (6.7) [5]$$

$$R = \frac{\omega \cdot t \cdot U_N^2}{Q \cdot \ln \frac{\sqrt{2} \cdot U_N}{u_r(t)}} \quad (6.8) [5]$$

Při dimenzování musíme brát na zřetel životnost odporu. Jako v podstatě nejjednodušší součást kondenzátoru by odpor měl mít nejdelší životnost a s jeho vlivem na bezpečnost je spolehlivost naprosto klíčová. Životnost odporu je snižována vystavováním součástky vyšším teplotám, jako maximum se uvažuje 40 °C u vnějších montáží. Optimální hodnota zatížení vybíjecího odporu je:

$$P_n = \frac{U_N^2}{K'_R \cdot N \cdot R} = \frac{U_N^2}{K_{RP} \cdot R} \quad (6.9) [5]$$

kde  $N$  je konstanta zatěžování,  $K'_R$  je konstanta dolní tolerance vybíjecího odporu ( $K'_R = 0,9$ ),  $K_{RP} = 0,54$ .

[5]

## 7. Popis současného stavu

Svým rozsahem a komplikovaností elektrorozvodné sítě v areálech Severočeských dolů a.s., tj. Doly Nástup Tušimice a Doly Bílina, vyžadují použití kombinace všech tří typů kompenzace účinníku. Jak již bylo uvedeno, za nedodržení předepsaného či domluveného účinníku přichází finanční sankce, které by se při objemu odebírané elektrické energie mohly pohybovat v řádech milionů.

Elektrická energie je přivedena do areálu dolů na hladině velmi vysokého napětí 110 kV, kde je následně transformována na vysokonapěťových 35 kV. Pomocí centrální kompenzace se zde finálně doladuje účinník. Elektrická energie je nadále rozvedena k dílčím TSN - transformovným střídavého napětí 35/6 kV.

Odtud je již elektrická energie vedena kabely k místům spotřeby v podobě poháněcích stanic pasových dopravníků. Velká kolesová rypadla, jaká se používají k odtěžování skrývky, jsou napájena napětím 35 kV. Kompenzační kiosky jsou připojovány za transformovny, abychom zamezili dalšímu zatěžování elektrické sítě jalovým proudem.

Každý kompenzační kiosk je připojen ke skupině poháněcích stanic o třech až pěti kusech. Počet poháněcích stanic ve skupině je závislý na výškovém profilu dráhy a také délce pasového dopravníku.

Pro vysvětlení je třeba uvést, že typická poháněcí stanice úseku skrývky o šířce pasu 1800 mm je vybavena třemi až čtyřmi kroužkovými asynchronními motory o jmenovitém výkonu 500 kW. V případě, že pasový dopravník má klesající profil, stačí poháněcí stanici pouze dva takové motory.

Zde je potřeba dát si pozor, protože nejvyšší úrovně jalové energie – nejhoršího účinníku asynchronního elektromotoru je dosahováno při chodu naprázdno. Musíme tedy správně zvolit počet poháněcích stanic, které jsme schopni vykompenzovat jedním kompenzačním kioskem.

Pokud však pohlédneme na problém z druhé strany, účinník se zlepšuje s nárůstem zatížení až k jmenovitým hodnotám. Paradoxně právě za této situace bude kompenzační kiosk spojen s nejmenším počtem poháněcích stanic, protože jsme limitováni výkonem transformátoru.

Aktuálně je skupinová kompenzace prováděna kompenzačními kiosky o kompenzačním výkonu 1400 kVAR při napětí 6,3 kV. Kompenzační kiosk je tvořen třemi bloky kondenzátorů o výkonech 200, 400 a 800 kVAR (model 1:2:4), s jejichž pomocí je k dispozici osm stupňů s odstupňováním po 200 kVAR jako v následující tabulce („0“ vypnuto; „1“ zapnuto):

Tabulka 3: Tabulka stavů kompenzace

stupeň	200 kVAR	400 kVAR	800 kVAR	Q <sub>celk</sub> (kVAR)
1	0	0	0	0
2	1	0	0	200
3	0	1	0	400
4	1	1	0	600
5	0	0	1	800
6	1	0	1	1000
7	0	1	1	1200
8	1	1	1	1400

Na kompenzační kiosek připadá majorita kompenzace účinníku při spouštění poháněcí stanice, kdy vlivem pružnosti gumového pásu dopravníku dochází k oscilaci zátěže a také při chodu s malou zátěží. Motory poháněcích stanic nikdy neběží zcela naprázdno.

Z hlediska souběžnosti se pasové dopravníky nespouštějí všechny naráz, nýbrž postupně. To samé platí pro vypínání. Jednak to znamená úsporu elektrické energie, protože poháněcí stanice není v chodu, když není potřeba, a jednak to dovoluje použití skupinové kompenzace. V opačném případě by vlastní kompenzační kiosek potřebovala každá poháněcí stanice.

Individuální kompenzace pak již udržuje účinník při plném zatížení u každého motoru. Jako taková má nižší kompenzační výkon.

Měřením bylo zjištěno, že pro kompenzaci jednoho elektromotoru poháněcí stanice je zapotřebí kompenzačního výkonu 185 kVAR. Abychom zjistili, jaký účinník kompenzujeme, musíme dosadit známé hodnoty do těchto vzorečků:

$$\cos \varphi' = 0,95 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi' = 0,329$$

$$Q_K = 185 \text{ kVAR}$$

$$Q' = P \cdot \operatorname{tg} \varphi' = 500 \cdot 10^3 \cdot 0,329 = 164,5 \text{ kVAR} \quad (7.1) [6]$$

$$Q = Q_K + Q' = 185 \cdot 10^3 + 164,5 \cdot 10^3 = 349,5 \text{ kVAR} \quad (7.2) [6]$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{349,5 \cdot 10^3}{500 \cdot 10^3} = 0,699 \rightarrow \cos \varphi = 0,82 \quad (7.3) [6]$$

Jelikož se kompenzační kondenzátory kvůli ochraně proti přepětí dimenzují pro jmenovité napětí  $U_n$  navýšené oproti standardní napěťové hladině  $U_{sítě}$ , zde  $U_n = 6,3 \text{ kV}$ , je potřeba rovněž tuto vlastnost zohlednit:

$$Q_n = Q_K \cdot \frac{U_n}{U_{sítě}} = 185 \cdot 10^3 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} = 194,25 \text{ kVAR} \quad (7.4) [6]$$

Z typizované řady byl vybrán kondenzátor s parametry 200 kVAR / 6,3 kV, což se velice blíží požadované hodnotě. Za účelem optimalizace jsem se rozhodl pro návrh kompenzačního kondenzátoru přímo o hodnotě 194,25 kVAR. S přihlédnutím k řadě vyvolených čísel E pro elektrické součástky (rezistory, kondenzátory a jiné) podle ČSN 35 8010 volím hodnotu kondenzátoru 196 kVAR z řady čísel E96.

Vnitřní zapojení kondenzátoru bude do trojúhelníku.

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D \quad (1.12) [10]$$

[6]

## 8. Vlastní návrh kondenzátoru

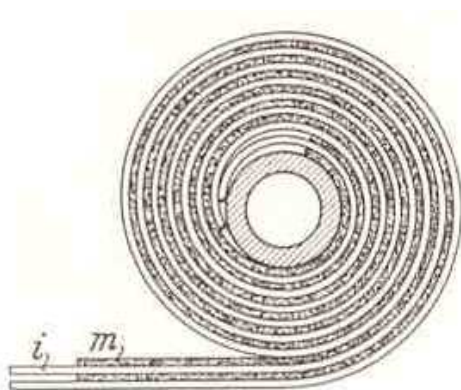
### 8.1 Návrh rozměrů svitků a nádoby

Jmenovité napětí  $U_N = 6,3 \text{ kV}$   
 Kompenzační výkon  $Q = 196 \text{ kVAR}$

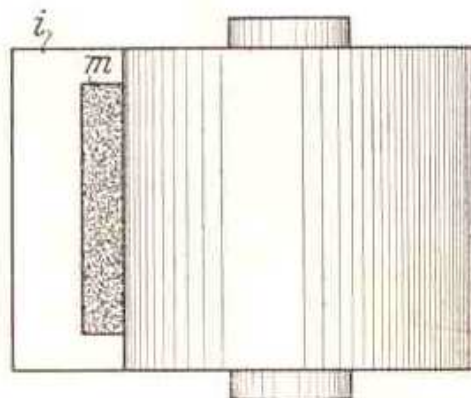
Jako dielektrikum bude použita polypropylenová fólie

Relativní permitivita  $\epsilon_r = 2,3$   
 Elektrická pevnost  $E_p = 300 \text{ kV/mm}$   
 Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta = 0,07 \%$

Kondenzátor bude složen ze dvou elektrod ve formě z jedné strany pokovené (m) polypropylenové fólie (i), jak je naznačeno na následujících obrázcích, kde jsou obě elektrody právě navinuty na trn:



Obrázek 23: Svitek navinutý na trnu [1]

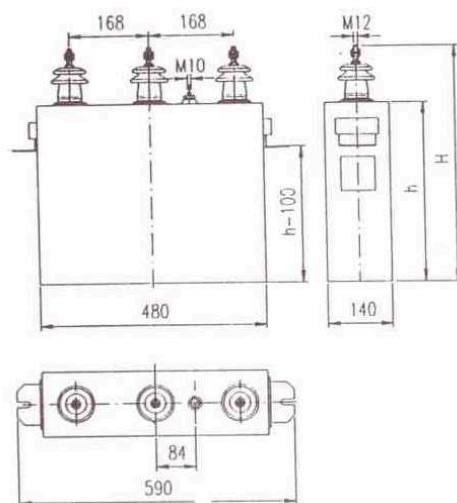


Obrázek 24: Svitek navinutý na trnu [1]

Rozhodl jsem se pro jednoduchou konstrukci se 4 sériově řazenými svitky pro každou fázi, celkem tak bude uvnitř kondenzátoru 12 svitků. Zajistím si tak nižší napěťové namáhání, naopak ale budu muset zvýšit elektrickou kapacitu jednotlivých svitků. S vnějšími rozměry kondenzátoru se budeme snažit přiblížit k již existujícímu kondenzátoru s podobným kompenzačním výkonem:

Tabulka 4: Vyráběné kompenzační kondenzátory [6]

Typ kondenzátoru	Jm. výkon (kVAr)	Jm. napětí (kV)	Jm. kapacita (μF)	Výška		Hmotnost (kg)
				h (mm)	H (mm)	
CPAKK 1-6,3/50	50	3x6,3	3x1,3	275	415	28
CPAKS 1-6,3/100	100	3x6,3	3x8	290	430	28
CPAKS 1-6,3/150	150	3x6,3	3x12	350	490	37
CPAKS 1-6,3/200	200	3x6,3	3x16	450	590	45



Obrázek 25: Pouzdro kondenzátoru [6]

S ohledem na tyto rozměry stanovíme:

Šířka polypropylenové fólie:

$$b_{pp} = 400 \text{ mm}$$

Šířka pokoveného části:

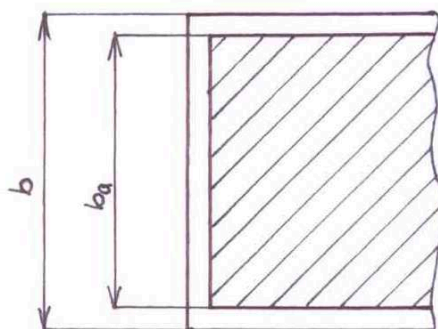
$$b_a = 380 \text{ mm}$$

Tloušťka vrstvy PP fólie:

$$d = 0,025 \text{ mm}$$

Tloušťka vrstvy naneseného Al:

$$d_a = 0,001 \text{ mm}$$

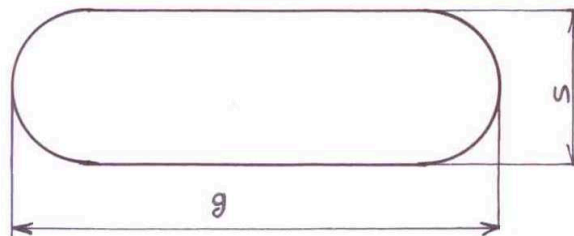


Obrázek 26: Náskres elektrody kondenzátoru



Potřebujeme určit:

1. rozměry elektrod, zejména aktivní délku  $l_a$
2. počet ovinů  $N$ , průměr navíjecího trnu  $d_t$  bude stanoven s ohledem na cílené rozměry kondenzátoru
3. rozměry stlačeného svitku  $g, s$



Obrázek 27: Stlačený kondenzátorový svitek

Ověření intenzity elektrického pole v dielektriku:

$$E_p = \frac{\frac{1}{4} \cdot U_N}{d} = \frac{\frac{1}{4} \cdot 6300}{0,025} = 63 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Dielektrikum z pohledu elektrické vyhovuje s téměř 5 násobnou rezervou.

Kondenzátor bude zapojen do trojúhelníku:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D$$

Z toho je odvozena kapacita jedné fáze:

$$C_D = \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_C}{U^2 \cdot \omega}$$

Vzhledem k vysokému napětí je kapacita rozdělena do čtyř sériově řazených svitků pro každou fází:

$$C_{sv} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{Q_C}{4}}{\left(\frac{U_N}{4}\right)^2 \cdot \omega} = \frac{4 \cdot Q_C}{U_N^2 \cdot \omega} = \frac{4 \cdot 196 \cdot 10^3}{(6,3 \cdot 10^3)^2 \cdot 314,16} = 62,908 \text{ } \mu\text{F}$$

Měrná kapacita:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{(d + d_a) \cdot d} = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3}{(0,025 \cdot 10^{-3} + 0,001 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,025 \cdot 10^{-3}} = 31,33 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Aktivní objem svitku:

$$V_a = \frac{C_{sv}}{C_1} = \frac{62,908}{31,33} = 2007,94 \text{ cm}^3$$

Průměr svitku:

Průměr trnu byl experimentálně stanoven  $d_t = 5,5 \text{ cm}$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_a}{b_a} + d_t^2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{2007,94}{38} + 5,5^2} = 9,876 \text{ cm}$$

Počet ovinů:

$$N = \frac{D - d_t}{4 \cdot (d + d_a)} = \frac{9,876 \cdot 10^{-2} - 5,5 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot (0,025 \cdot 10^{-3} + 0,001 \cdot 10^{-3})} = 420,737 \approx 421 \text{ ovinů}$$

Aktivní délka elektrod:

$$C_{sv} = 0,17708 \cdot \frac{\epsilon_r \cdot b_a \cdot l_a}{k \cdot d}$$

$$l_a = \frac{C_{sv} \cdot d}{0,17708 \cdot \epsilon_r \cdot b_a} = \frac{62,908 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3}}{0,17708 \cdot 2,3 \cdot 380 \cdot 10^{-3}} = 101,617 \text{ m}$$

Tvar zploštěného svitku:

$$s = 4 \cdot (d + d_a) \cdot N = 4 \cdot (0,025 + 0,001) \cdot 421 = 43,784 \approx 43,8 \text{ mm}$$

$$g = \frac{\pi}{2} \cdot d_t + s = \frac{\pi}{2} \cdot 5,5 + 43,8 = 130,178 \approx 130,2 \text{ mm}$$

## 8.2 Ověření oteplení kondenzátorového svitku

V kondenzátorovém svitku se při jeho funkci generuje teplo. Při ustáleném stavu dochází k rovnováze mezi teplem vzniklým a teplem odvedeným. Množství odvedeného tepla závisí na použitých materiálech, ale také na teplotním gradientu. Musí být zajištěno, aby této rovnováhy bylo dosaženo dříve, než materiál svitku dosáhne své maximální provozní teploty - pro polypropylen 105 °C. [15]

Výpočet provedeme pro jeden ze středních svitků, protože oproti těm krajním má méně chladících ploch. Za předpokladu, že jsou všechny svitky stejně namáhané, generuje se v nich stejné množství tepla, a tudíž mají stejnou teplotu, nedochází mezi nimi k přestupu tepla. Střední svitek je ze dvou stran obklopen sousedními svitky, a tak mu k odvodu tepla zůstávají už jen další dvě strany, víko a dno.

Jelikož však předem nevíme, v jakém poměru se tepelný tok rozdělí mezi jednotlivé směry/plochy, potřebujeme provést transformaci parametrů jednotlivých ploch do podoby, ve

které jsme schopni s nimi dále pracovat. My použijeme metodu tepelných odporů s nimiž se pak již počítá analogicky k výpočtům s elektrickým odpory.

#### Boční stěny

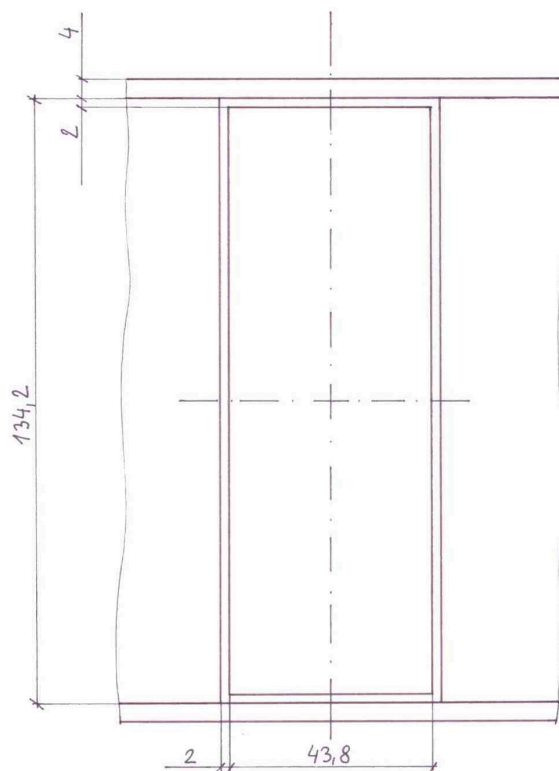
Pouzdro kondenzátorového svítka je vyrobeno z hliníkového plechu o síle 2 mm. Vnější rozměry pouzdra svítka jsou 47,8 x 134,2 x 404 mm.

Pouzdro kondenzátoru je z hliníkového plechu o síle 2 mm.

Součinitel tepelné vodivosti hliníku je:  $\lambda_{Al} = 205 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla pro přirozeně proudící vzduch při teplotě při 40°C:  $\alpha_{air40} = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Pohltivost matného hliníku je:  $\varepsilon_{Al} = 0,07$  [7] [9]



**Obrázek 28: Půdorys pouzdra svítka**

Tepelný odpor boční stěny pouzdra svítka:

$$R_{vps} = \frac{l_p}{\lambda_{Al} \cdot S_s} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 404 \cdot 10^{-3}} = 5,51 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor boční stěny pouzdra kondenzátoru:

$$R_{vks} = \frac{l_k}{\lambda_{Al} \cdot S_s} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 404 \cdot 10^{-3}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor přestupu tepla konvekcí:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta \vartheta \rightarrow \frac{1}{\alpha_{air40} \cdot S} = \frac{\Delta \vartheta}{Q} = R$$

$$R_{kks} = \frac{1}{\alpha_{air40} \cdot S_s} = \frac{1}{20 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 404 \cdot 10^{-3}} = 2,83 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný tok dnem:

$$\Phi_{zks} = C \cdot \varepsilon_{Al} \cdot S_s \cdot \left[ \left( \frac{\theta_K}{100} \right)^2 - \left( \frac{\theta_O}{100} \right)^2 \right] =$$

$$\Phi_{zks} = 5,6697 \cdot 0,07 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 404 \cdot 10^{-3} \left[ \left( \frac{353,15}{100} \right)^4 - \left( \frac{313,15}{100} \right)^4 \right] = 0,42 \text{ W}$$

Jak je patrné z výpočtu, při námi očekávaných teplotách je množství vyzařeného tepla velice malé, pro potřeby našeho výpočtu tak můžeme vliv radiace tepla opomenout.

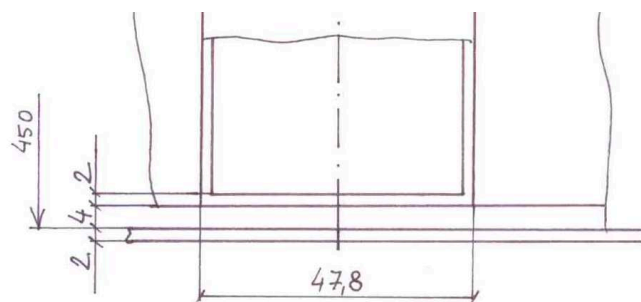
Dno

Kondenzátor je umístěn na podlaze kompenzačního kiosku z ocelového plechu o síle 2mm. Pod kioskem je vzduchová mezera přibližně 25 cm.

Součinitel tepelné vodivosti oceli je:  $\lambda_{Fe} = 54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Pohltivost zoxidované oceli je:  $\varepsilon_{Fe} = 0,82$

[7] [9]



**Obrázek 29: Bokorys dna pouzdra svítku**

Tepelný odpor dna pouzdra svítku:

$$R_{vpd} = \frac{l_p}{\lambda_{Al} \cdot S_d} = \frac{2 \cdot 10^3}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor dna pouzdra kondenzátoru:

$$R_{vkd} = \frac{l_k}{\lambda_{Al} \cdot S_d} = \frac{4 \cdot 10^3}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 3,32 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor dna kiosku:

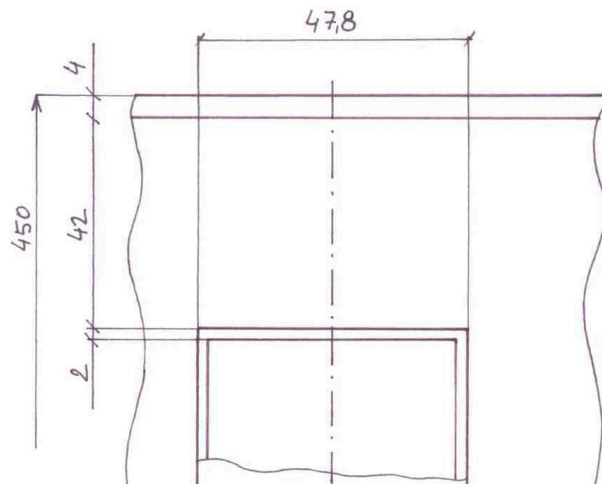
$$R_{vpl} = \frac{l_{pl}}{\lambda_{Fe} \cdot S_d} = \frac{2 \cdot 10^3}{54 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor přestupu tepla konvekcí:

$$R_{kkd} = \frac{1}{\alpha_{air40} \cdot S_d} = \frac{1}{20 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 8,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Víko

Součinitel přestupu tepla pro přirozeně proudící vzduch při teplotě při 50°C:  $\alpha_{air50} = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$   
 Vzduchová mezera mezi víkem pouzdra svitku a víkem kondenzátoru je vysoká 42 mm.  
 Vzhledem k malé pohltivosti hliníku ani zde nemá smysl uvažovat radiaci.



Obrázek 30: Bokorys víka pouzdra svitku

Tepelný odpor víka pouzdra svitku:

$$R_{vpv} = \frac{l_p}{\lambda_{Al} \cdot S_v} = \frac{2 \cdot 10^3}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Vzduchová mezera:

Tepelný odpor přestupu tepla konvekcí z víka svitku:

$$R_{kkvs} = \frac{1}{\alpha_{air50} \cdot S_v} = \frac{1}{25 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 6,8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor přestupu tepla konvekcí do víka kondenzátoru:

$$R_{kkvk} = \frac{1}{\alpha_{air50} \cdot S_v} = \frac{1}{25 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 6,8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor víka pouzdra kondenzátoru:

$$R_{vkv} = \frac{l_v}{\lambda_{Al} \cdot S_v} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{205 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 3,32 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor přestupu tepla konvekci:

$$R_{kkv} = \frac{1}{\alpha_{air40} \cdot S_v} = \frac{1}{20 \cdot 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 8,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelné odpory jednotlivých vrstev ochlazovacích ploch se vzájemně chovají jako sériově řazené elektrické odpory – celkový odpor je prostým součtem dílčích odporů. Odpory jednotlivých stěn se pak vzájemně chovají jako paralelně řazené elektrické odpory – sčítají se vodivosti – převrácené hodnoty odporů.

Tepelný odpor stěny:

$$R_s = R_{vps} + R_{vks} + R_{kks} = 5,51 \cdot 10^{-4} + 1,1 \cdot 10^{-3} + 2,83 \cong 2,83 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor dna:

$$R_d = R_{vpd} + R_{vkd} + R_{vpl} + R_{kkd} = 1,66 \cdot 10^{-3} + 3,22 \cdot 10^{-3} + 6,3 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cong 8,52 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor víka:

$$R_v = R_{vpv} + R_{kkvs} + R_{kkvk} + R_{vkv} + R_{kkv} = 1,66 \cdot 10^{-3} + 6,8 + 6,8 + 3,32 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cong 23,82 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Celkový tepelný odpor jednoho svítku pak je:

$$R_c = \frac{1}{\frac{2}{R_s} + \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_v}} = \frac{1}{\frac{2}{2,83} + \frac{1}{8,52} + \frac{1}{23,82}} \cong 1,15 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Určení ztrátového výkonu svítku:

Ztráty v dielektriku:

$$P_D = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \tan \delta = \frac{1}{12} \cdot 6300^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 15,7 \cdot 0,0007$$

$$P_D = 34,25 \text{ W}$$

Ztráty v kovových částech:

$$P_K = \frac{1}{6} \cdot I^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{b \cdot h} = \frac{1}{6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U)^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{b \cdot h}$$
$$P_K = \frac{1}{6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 62,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1575)^2 \cdot 0,0273 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{0,38 \cdot 10^{-6}} = 11,56 \text{ W}$$

Celkové ztráty v jednom svitku:

$$P_C = P_D + P_K = 34,25 + 11,56 = 45,81 \text{ W}$$

Teplotní gradient:

$$\Delta \vartheta = \frac{P_C}{R_c} = \frac{45,81}{1,15} = P_C \cdot R_c = 45,81 \cdot 1,15 = 52,68 \cong 53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota uvnitř svitku:

$$\vartheta = \vartheta_o + \Delta \vartheta = 40 + 53 = 93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Maximální provozní teplota polypropylenové fólie je 105 °C. Kondenzátor teplotně vyhovuje.

### 8.3 Dimenzování tavného vodiče

Kompenzační výkon:

$$Q = 196 \text{ kVAR při } U_N = 6,3 \text{ kV}$$

Proud tekoucí příívodem:

$$I_N = \frac{Q}{3 \cdot U_N} = \frac{195 \cdot 10^3}{3 \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 10,32 \text{ A}$$

Proud tekoucí 1 fází/svitkem:

$$I_{Nf} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{10,32}{\sqrt{3}} = 5,96 \text{ A}$$

Krajní proud pojistky:

$$I_{KR} = 1,6 \cdot I_{Nf} = 1,6 \cdot 5,96 = 9,53 \text{ A}$$

Předpokládaná teplota vodiče 500 °C

$$\rho_{500} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 0,01724 \cdot (1 + 0,04 \cdot (500 - 20)) = 0,0503 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}$$

Minimální průměr tavného vodiče:

$$d_{\min} = I_{KR}^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot \alpha \cdot \vartheta_{tav}}{4 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{3}} = 9,53^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot 20 \cdot 1089}{4 \cdot 0,0503} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,04398 \text{ mm}$$

S přihlédnutím k rekrytalizaci povrchu volím navýšení průměru o 25%:

$$d = d_{\min} \cdot 1,25 = 0,04398 \cdot 1,25 = 0,055 \text{ mm}$$

Délka vodiče pak je:

$$l = 3,67 \cdot \frac{k \cdot 0,5 \cdot C \cdot U_{sek}^2}{d^2 \cdot (c \cdot \Delta \vartheta + l_t + k_0 \cdot l_v) \cdot \gamma}$$

kde  $k = 0,25 - 75 \%$  energie se spotřebuje mimo pojistku v sériově řazených částech obvodu

$$\begin{aligned} c &= 384 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}; & \Delta \vartheta &= 1008 ^\circ\text{C}; & l_t &= 209,3 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \\ l_v &= 4,82 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}; & k_0 &= 0,25 & & \text{opatření } 25 \% \text{ objemu vodiče} \\ \gamma &= 8890 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \end{aligned}$$

po dosazení pak dostaneme:

$$l = 3,67 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,5 \cdot 15,73 \cdot 10^{-6} \cdot 6300^2}{(5,5 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (384,3 \cdot 998 + 209,3 \cdot 10^3 + 0,25 \cdot 4,82 \cdot 10^6) \cdot 8890} = 0,059 \text{ m} = 5,9 \text{ cm}$$

Výpočet teploty tavného vodiče při zatížení jmenovitým proudem:

$$R \cdot I^2 = \alpha \cdot A \cdot \vartheta + c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$$

$$\frac{4 \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot d^2} \cdot I_N^2 = \alpha_k \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{4 \cdot \rho \cdot I_{Nf}^2}{\pi^2 \cdot d^3 \cdot \alpha_k} = \frac{4 \cdot 0,0503 \cdot I_N^2}{\pi^2 \cdot 0,055^3 \cdot 20} = 217,6 ^\circ\text{C}$$

$$T_N = T_i + \Delta T = 85 + 217,6 = 302,6 ^\circ\text{C}$$

## 8.4 Dimenzování vybíjecích odporů

Dosazením do známých rovnic vypočteme hodnotu elektrického odporu a jeho zatížení:

$$R = \frac{\omega \cdot t \cdot U_N^2}{Q \cdot \ln \frac{\sqrt{2} \cdot U_N}{u_r(t)}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 60 \cdot 6300^2}{196 \cdot \ln \frac{\sqrt{2} \cdot 6300}{50}} = 736473 \Omega \cong 736 \text{ k}\Omega$$

$$P_n = \frac{U_N^2}{K'_R \cdot N \cdot R} = \frac{U_N^2}{K_{RP} \cdot R} = \frac{6300^2}{0,54 \cdot 736 \cdot 10^3} = 99,8 \text{ W}$$



## Závěr

Optimalizaci kompenzačního kiosku jsme se rozhodli řešit návrhem výkonového kondenzátoru o hodnotě více odpovídající reálným požadavkům provozu.

Z ekonomických i technologických důvodů bude kompenzační kiosek tvořen kondenzátory o výkonu 196 kVAR, vyšší úrovně pak budou tvořeny odpovídajícím počtem paralelně řazených kondenzátorů jednotného typu. V případě realizace projektu tak dosáhneme řady výhod:

1. Bude potřeba vyvinout pouze jeden typ kondenzátoru.
2. Vyrobí se více kusů, což by mělo zlevnit výrobu – cenu za kus.

Navržený kondenzátor má kapacitu  $3 \times 15,7 \mu\text{F}$ , jako dielektrikum byla použita polypropylenová fólie. Každá fáze má 4 sériově řazené svitky.

Výpočtem byla ověřena teplotní stabilita kondenzátorového svitku. Vybíjecí odpor i vnitřní pojistka jsou navrženy vždy pro jednu fázi a nikoli pro jednotlivé svitky.

Při práci jsem narazil na problém s nedostatkem tématické technické literatury, která byla často několik desítek let stará, napsaná ruskými autory a v originále tak pro mě nepoužitelná. Je tak možné, že diplomová práce nesleduje nejnovější trendy v oblasti výkonových kondenzátorů. Před případnou realizací projektu by proto bylo lepší navrženou podobu kondenzátoru konzultovat s renomovaným výrobcem.

Při návrhu kondenzátoru mi byl velkým pomocníkem program MS Excel, který ukázal své výhody především při hledání optima způsobem pokus – omyl.

## Literatura

- [1] BAUER, F. Der Kondensator in der Starkstromtechnik. Berlin: Julius Springer, 1934.
- [2] DOLEČEK, J. Moderní učebnice elektroniky – 1. díl: Základy elektroniky, ideální a reálné prvky: rezistor – kondenzátor - cívka. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 344 s. ISBN 80-7300-146-2
- [3] DRUGDA, J., HOLOUBEK, J., HUDEC, J. Kompenzace účinníku v energetice, průmyslových a zemědělských podnicích: sborník přednášek. 1. vyd. Trutnov: Dům kultury ROH Trutnov, 1989. ISBN 80-85012-29-4
- [4] FORMÁNEK, B., MILOŠ, P., POLJAK, F. Materiály a technologie II. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 145 s.
- [5] FUKA, J., HAVELKA, B. Elektřina a magnetismus. 3. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství n.p., 1979. 656 s.
- [6] HÁLA, P., LACINA, B. Kompenzace v teorii a praxi s příklady výpočtů. 1. vyd. Brno: Elektromanagement, 1994.
- [7] HEŘMAN, J. Příručka silnoproudé elektrotechniky. Praha: SNTL, 1986. 1032 s.
- [8] Introduction to heat transfer [online].[2012-11-28]. Dostupné z <http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Mechanical/Heat%20and%20Mass%20Transfer/Conduction/Module%201/interactivepages/prob1.3in.html>
- [9] KONTHANDAMARAN, C. P., SUBRAMANYAN, S. Fundamentals of heat and mass transfer.[online].c2008 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z <http://books.google.cz/books?id=hIviT25WWIEC&pg=PA281&lpg=PA281&dq=heat+transfer+coefficient+air+w/m2k&source=bl&ots=ORcwta8lrK&sig=I7AxHMGkvlCgatJj0YvikmbgOX8&hl=cs&sa=X&ei=7xm5UOq3BNHQsgb3kICgCw&sqi=2&ved=0CD4Q6AEwAg#v=onepage&q=heat%20transfer%20coefficient%20air%20w%2Fm2k&f=false>
- [10] KORENC, V., HOLOUBEK, J. Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1. vyd. Praha: IN-EL, spol s.r.o., 1999. 123 s. ISBN 80-86230-07-4
- [11] MALINA, V. Poznáváme elektroniku: Část 2. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 2002. 193 s. ISBN 80-7232-172-2
- [12] NOVOTNÝ, D. Elektrické přístroje silnoproudé. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1975. 173 s.
- [13] POLÁČEK, D. Elektrotechnické tabulky: Hodnoty, vztahy a výpočty. Ostrava: MONTANEX, a.s., 1996. ISBN 80-85780-48-8
- [14] POLJAK, F. Dielektriká – izolanty. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1983. 176 s.
- [15] ROŠKOTA, S. Elektrotechnické tabulky. Praha: SNTL, 1982. 368 s.

- [16] Studijní materiály [online]. [2012-11-29]. Dostupné z [http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/est/Kombinovani.htm](http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/est/Kombinovani.htm)
- [17] SUKHATME, S.P. Textbook of Heat Transfer. [online]. c2006 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z [http://books.google.cz/books?id=-VgAZm6KWrwC&pg=PA309&lpg=PA309&dq=heat+transfer+coefficient+air+w/m2k&source=bl&ots=iNWLCP7jnh&sig=a6XHwLhvgFWHe26knYwLLFtI1\\_Y&hl=cs&sa=X&ei=7xm5UOq3BNHQsgb3kICgCw&sqi=2&ved=0CEAQ6AEwAw#v=onepage&q=heat%20transfer%20coefficient%20air%20w%2Fm2k&f=false](http://books.google.cz/books?id=-VgAZm6KWrwC&pg=PA309&lpg=PA309&dq=heat+transfer+coefficient+air+w/m2k&source=bl&ots=iNWLCP7jnh&sig=a6XHwLhvgFWHe26knYwLLFtI1_Y&hl=cs&sa=X&ei=7xm5UOq3BNHQsgb3kICgCw&sqi=2&ved=0CEAQ6AEwAw#v=onepage&q=heat%20transfer%20coefficient%20air%20w%2Fm2k&f=false)
- [18] TKOTZ, K. Příručka pro elektrotechniku. 1.vyd. Praha: Europa-Sobotáles cz. s.r.o., 2002. 564 s. ISBN 80-86706-00-1